



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Tecnología de la Construcción

Monografía

EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA, NUTRIENTES Y PATÓGENOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE JINOTEGA

Para optar al título de Ingeniero Civil

Elaborado por

Br. David Misael Alfaro Castillo
Br. Katherine Iveth Báez Rodríguez

Tutor

M.Sc. Sergio Junior Navarro Hudiel

Asesor

M.Sc. Henry Javier Vílchez Pérez

Managua, septiembre 2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Tecnología de la Construcción

Monografía

EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA, NUTRIENTES Y PATÓGENOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE JINOTEGA

Para optar al título de Ingeniero Civil

Elaborado por

Br. David Misael Alfaro Castillo
Br. Katherine Iveth Báez Rodríguez

Tutor

M.Sc. Sergio Junior Navarro Hudiel

Asesor

M.Sc. Henry Javier Vílchez Pérez

Managua, septiembre 2019

Dedicatoria

Esta investigación está dedicada primeramente a Dios por darme el conocimiento y la entereza de poder seguir adelante cada día.

A mis padres Cesar Alfaro e Idalia Castillo, por guiarme, siempre creer en mí y apoyarme en todo lo que me he propuesto; a mis hijos Fabiana y Camilo Alfaro por quienes he luchado cada día.

A mis hermanos Elmer, Urania, Lisbeth y Cesar Alfaro, por brindarme su apoyo incondicional.

De manera muy especial a mi tío Alejandro Alfaro.

DAVID MISAEAL ALFARO CASTILLO

Dedicatoria

Con todo el amor de mi corazón y con mucha gratitud dedico este trabajo:

A Dios, mi padre celestial, señor mío, por permitirme el haber llegado hasta aquí cuando ni yo lo creía, por darme sabiduría, y la voluntad de seguir siempre adelante; por cuidar en todo momento de mi familia y de mis amigos; por no dejarme de la mano en los momentos de oscuridad y aún más en mis momentos felices, gracias por no desampararme.

A mis padres, Martha Iveth Rodríguez Obando y Marlon René Báez Matamoro, por brindarme siempre su confianza y apoyo incondicional, a mis cuñadas Nohemy y Jenny Betanco; y a mi novio Marcos Betanco por preocuparse y cuidar de mí.

En especial dedico esta monografía a la memoria de mi querido amigo y hermano, Ing. Cruz Alberto Obregón López, muchas gracias por haberme inculcado buenos consejos durante el tiempo que Dios me concedió la dicha de tenerte a mi lado, por dejarme una gran influencia en mi vida, por haberme regalado buenos momentos que recordare y atesoraré siempre en mi alma y por haber sido el mejor amigo que jamás imaginé tener, mis triunfos son los tuyos.

KATHERINE IVETH BÁEZ RODRÍGUEZ

Agradecimientos

Agradecemos a Dios nuestro maestro de vida, que en todo momento nos ha iluminado para seguir el camino y alcanzar los objetivos propuestos.

Muchas gracias al M.Sc. Henry Javier Vílchez Pérez, por todo su amor y dedicación, por el conocimiento brindado durante todo el tiempo de la realización de este estudio.

Gracias a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron, ya que sin ellos no hubiese sido posible la culminación de nuestro proyecto investigativo.

A los maestros, que compartieron sus conocimientos y nos guiaron durante los cinco años de estudio.

¡Muchas gracias y abundantes bendiciones!

DAVID MISAEAL ALFARO CASTILLO

KATHERINE IVETH BÁEZ RODRÍGUEZ

Resumen

Se realizó una evaluación de la remoción de carga orgánica, nutrientes y patógenos del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) de la ciudad de Jinotega entre el período comprendido de marzo a julio de 2019.

Se procedió a determinar las variaciones de caudal en el afluente y efluente del STAR. Mediante un monitoreo de siete días durante 24 horas continuas por medio de los cuales se obtuvo un valor promedio de caudal en el afluente de 76.37 L/s, valor que se encuentra por arriba de 45.3 L/s del caudal de diseño del año 2005, y un valor promedio en el efluente de 75.53 L/s.

Se realizó el análisis de DBO₅ de acuerdo con el artículo 26 establecido en el Decreto 21-2017 *Disposiciones para el vertido de aguas residuales* dando una diferencia de 0.64 mg/L con respecto a la normativa, considerando que el valor máximo permisible es de 110 mg/L, cumpliendo así con este Decreto; mientras que con los valores establecidos en *la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense para regular los Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales y su reúso* (NTON 05 027-05), el valor de DBO₅ obtenido es superior a los valores máximos permisibles para aguas residuales de reúso teniendo 79.36 mg/L por encima de lo permitido a los 30 mg/L.

Con respecto a nutrientes se tiene un límite máximo permisible de 10 mg/L, los análisis de laboratorio indican una cantidad de fósforo en el efluente de 2.67 mg/L, de esta manera cumple con lo estipulado en el Decreto 21-2017 en su artículo 26.

Teniendo en cuenta que los períodos de retención dan un total de cuatro días debido a que actualmente el sistema está trabajando con uno de sus dos módulos. Por ende esto se verá reflejado en la remoción de patógenos porque para lograr una remoción de dos ciclos logarítmicos de coliformes fecales se necesitan al menos 10 días de retención en los sistemas lagunares.

No obstante, el efluente final registró una eficiencia media en el efluente de 81 % en la remoción de coliformes fecales; sin embargo con base en el artículo 24 del Decreto 21-2017, el valor máximo permisible de coliformes es de 1E+05

NMP/100mL que al ser contrastado con los resultados del efluente general del STAR es de $1.25\text{E}+07$ NMP/100mL, el cual no cumple en comparación a los valores establecidos.

Así mismo, al ser comparados con base en el Decreto 77-2003 *De establecimiento de las disposiciones que regulan las descargas de aguas residuales domésticas provenientes de los sistemas de tratamiento en el Lago Xolotlán* no cumple con el valor máximo para coliformes fecales de $5\text{E}+05$ NMP/100mL.

La evaluación de las cargas se refiere a carga orgánica en función de DBO_5 las cuales dieron un valor en la laguna primaria de 2874.1 kg DBO_5 /día, en la laguna secundaria 1355 kg DBO_5 /día y en laguna terciaria de 834.6 kg DBO_5 /día dando un valor total de 5063.67 kg DBO_5 /día, en función de fósforo en el afluente un valor de 3.94 mg/L, en la laguna primaria de 5.54 mg/L y en laguna secundaria de 2.91 mg/L con un valor promedio en efluente de 2.67 mg/L, los valores de coliformes fecales en el afluente de $6.63\text{E}+07$ NMP/100mL, en la laguna primaria de $8.55\text{E}+06$ NMP/100mL, en la laguna secundaria $1.18\text{E}+07$ NMP/100mL, y en el efluente un valor promedio $1.25\text{E}+07$ NMP/100mL.

Se realizó una simulación de gases de efecto invernadero en función de metano (CH_4) con base en las directrices del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2006) y su manual de buenas prácticas ambientales, dando como resultado una emisión de metano anual de 54821.001 kg CH_4 /año utilizando el método de recopilación de datos, método que tiene un nivel más alto de fiabilidad en comparación con el método de examen que nos proporcionó una emisión de 521856.35 kg CH_4 /año, debido a que se toman en su mayoría valores por defecto brindados por el manual.

ÍNDICE

CAPÍTULO I. GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes	3
1.3. Justificación.....	5
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
CAPITULO II. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	9
2.1. Área de estudio.....	9
2.2. Servicios básicos de la ciudad de Jinotega	10
2.2.1 Manejo de residuos sólidos.....	10
2.2.2 Agua y saneamiento	11
2.3. Actividad económica.....	12
2.4. Evaluación de emplazamiento de acuerdo a la NTON 05-027 05	13
2.5. Descripción de la planta.....	17
2.5.1. Tratamiento preliminar	17
2.5.2. Tratamiento primario	20
2.5.3. Tratamiento secundario.....	23
2.5.4. Tratamiento terciario	25
2.5.5. Efluente general del STAR de Jinotega	27
2.5.6. Parámetros operacionales	28
2.5.7. Condiciones de mantenimiento	29
CAPITULO III. MARCO TEÓRICO.....	33
3.1. Aguas residuales	33
3.1.1. Generalidades.....	33
3.1.2. Características de las aguas residuales.....	33
3.1.3. Niveles de tratamiento de aguas residuales domesticas	35
3.2. Lagunas de estabilización.....	36
3.2.1. Generalidades.....	36
3.2.2. Procesos que se desarrollan en las lagunas de estabilización	37

3.2.3.	Coloración	38
3.3.	Nutrientes	39
3.4.	Organismos patógenos	40
3.5.	Carga orgánica	40
3.6.	Gases de Efecto Invernadero (GEI)	40
3.6.1.	Metano (CH ₄)	41
3.6.2.	Directrices ambientales del IPCC, 2006	41
CAPITULO IV. DISEÑO METODOLÓGICO		44
4.1.	Tipo de investigación	44
4.2.	Etapa 1	44
4.2.1.	Cálculo de caudales	44
4.2.2.	Período de retención	47
4.2.3.	Recolección y preparación de muestra	47
4.3.	Etapa 2	49
4.3.1.	Parámetros físico-químicos a evaluar	49
4.3.2.	Determinación de cargas contaminantes	51
4.3.3.	Determinación de las eficiencias en el STAR	53
4.4.	Etapa 3	54
4.4.1.	Determinación de los Gases de Efecto Invernadero (GEI)	54
CAPITULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS		63
5.1.	Aporte, distribución y variación de caudales	63
5.2.	Determinación del caudal de la laguna mediante el balance hídrico	67
5.3.	Determinación del período de retención	68
5.4.	Resultados de análisis físicos – químicos del STAR	69
5.5.	Determinación de carga de nutrientes (fósforo total)	72
5.6.	Determinación de carga de patógenos (coliformes fecales)	73
5.7.	Determinación de las eficiencias del STAR	77
5.8.	Determinación de carga orgánica	78
5.8.1.	Determinación de la carga orgánica total y carga orgánica per cápita	78
5.8.2.	Determinación de la carga orgánica superficial aplicada	79
5.8.3.	Determinación de habitante equivalente	80

5.9.	Determinación de gases de efecto invernadero (GEI)	81
5.9.1.	Determinación de metano por medio del método de examen	82
5.9.2.	Determinación del metano por el método de recopilación de datos	85
5.9.3.	Comparación del método de examen y el método de recopilación de datos, para las emisiones de metano	89
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		92
6.1	Conclusiones	92
6.2	Recomendaciones	94
BIBLIOGRAFÍA		96

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.- Determinación de caudal para canaleta Parshall	45
Ecuación 2.- Ecuación de la continuidad	45
Ecuación 3.- Determinación de balance hídrico	46
Ecuación 4.- Corrección al balance hídrico	47
Ecuación 5.- Determinación del período de retención.....	47
Ecuación 6.- Recolección para muestras compuestas.....	48
Ecuación 7.- Determinación de carga de contaminante (CC)	52
Ecuación 8.- Carga orgánica per cápita	52
Ecuación 9.- Carga superficial máxima	52
Ecuación 10.- Carga orgánica superficial aplicada	53
Ecuación 11.- Habitante equivalente.....	53
Ecuación 12.- Determinación de las eficiencias del STAR de Jinotega	54
Ecuación 13.- Cálculo del metano por el método del examen	55
Ecuación 14.- Emisiones totales de metano procedentes de las aguas residuales domésticas	57
Ecuación 15.- Factor de emisión de metano para cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación de aguas residuales domésticas.....	59
Ecuación 16.- Total de materia orgánica degradable en las aguas residuales domésticas	60

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 1.- Tratamiento preliminar	18
Esquema 2.- Tratamiento primario	22
Esquema 3.- Tratamiento secundario.....	25
Esquema 4.- Tratamiento terciario	26
Esquema 5.- Efluente general del STAR.....	27
Esquema 6.- Puntos de la toma de muestras en el STAR	49
Esquema 7.- Rendimiento obtenido en cada unidad del STAR.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Recolección de residuos sólidos.....	11
Tabla 2.- Ubicación de los sistemas de tratamientos de aguas residuales.....	14
Tabla 3.- Parámetros operacionales	28
Tabla 4.- Condiciones de mantenimiento.....	29
Tabla 5.- Parámetros físico-químicos y bacteriológicos.....	50
Tabla 6.- Valores máximos permisibles por el Decreto 21 – 2017	50
Tabla 7.- Los permisos de descarga no podrán ser mayores a los siguientes parámetros, límites y frecuencias (Decreto 77-2003).....	50

Tabla 8.- Límites máximos permisibles para aguas residuales de reúso (NTON 05 027-05)	51
Tabla 9.- Datos históricos del caudal en el afluente del STAR de Jinotega	66
Tabla 10.- Determinación del caudal de la laguna mediante el balance hídrico ...	67
Tabla 11.- Período de retención hidráulico TRH	68
Tabla 12.- Resultados promedios del monitoreo de muestras de DBO ₅	72
Tabla 13.- Resultados de fósforo total vs Decreto 21-17 en cada fase de tratamiento	72
Tabla 14.- Períodos y límites establecidos por el Decreto 21-2017 respecto a coliformes fecales	74
Tabla 15.- Valores promedios de afluente y efluente vs el decreto 21-2017, Decreto 77-2003	74
Tabla 16.- Datos históricos de coliformes fecales en el efluente del sistema	76
Tabla 17.- Carga orgánica total y carga orgánica per cápita a tratar con respecto a DBO ₅	78
Tabla 18.- Carga orgánica superficial máxima	79
Tabla 19.- Carga orgánica superficial aplicada real (Csa)	80
Tabla 20.- Determinación de habitantes equivalentes para la zona norte del país	81
Tabla 21.- Emisión de metano por el método de examen	83
Tabla 22.- Total de materia orgánica degradable (TOW)	85
Tabla 23.- Factor de emisión CH ₄	86
Tabla 24.- Emisión de metano por el método de recopilación de datos	87

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.- Mediciones de caudal en el afluente	63
Gráfico 2.- Mediciones de caudal en el efluente	64
Gráfico 3.- Caudales promedios máximos, medios y mínimos en el afluente	65
Gráfico 4.- Caudales promedios máximos, medios y mínimos en el efluente	66
Gráfico 5.- Concentraciones de DBO ₅ en el afluente del STAR	70
Gráfico 6.- Concentraciones de DBO ₅ en el efluente del STAR	71
Gráfico 7.- Coliformes fecales promedio en el afluente y efluente vs decreto 21-2017 vs Decreto 77-2003	76
Gráfico 8.- Emisión anual de metano mediante el método de examen	84
Gráfico 9.- Emisión anual de metano mediante el método de recopilación de datos	88
Gráfico 10.- Emisión anual de metano por el método de examen vs el método de recopilación de datos	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.- Macro localización.....	9
Ilustración 2.- Micro localización.....	10
Ilustración 3.- Análisis de amenaza y crecimiento poblacional en la ciudad de Jinotega.....	13
Ilustración 4.- Recolección de muestras.....	48

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Etapas	44
Figura 2.- Elección según el método del examen del IPCC	55
Figura 3.- Árbol de decisión para estimar las emisiones de CH ₄ procedentes de las aguas residuales domésticas.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS

STAR: Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

ENACAL: Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados

INAA: Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados

PIENSA: Programa de Investigación Estudios Nacionales y Servicios Ambientales

GEI: Gases de Efecto Invernadero

CH₄: Metano

pH: Potencial de hidrógeno

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno

MARENA: Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales

PROATAS: Programa de Asistencia Técnica en Agua y Saneamiento

HE: Habitante Equivalente

OMS: Organización Mundial de la Salud

NTON: Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico

TOW: Total Organic Waste

NMP: Numero Mas Probable

Q: Caudal

M³: Metros cúbicos

Kg: Kilogramos

°C: Grados centígrados

Ha: Hectáreas



Líder en Ciencia y Tecnología

CAPÍTULO I

Generalidades

“No se puede enseñar nada a un hombre; solo se le puede ayudar a encontrar la respuesta dentro de sí mismo.”

-Galileo Galilei

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1. Introducción

El mejoramiento de la salud, el saneamiento a nivel mundial y la consiguiente reducción de la propagación de enfermedades, dependen en gran medida de las buenas prácticas de higiene, la disponibilidad de instalaciones de salud y la recolección y el tratamiento fiables de las aguas residuales. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que 4,500 millones de personas carecen de un saneamiento seguro para la evacuación de excretas (OMS, 2017).

Las redes de alcantarillado de aguas residuales y los sistemas de tratamiento centralizado y descentralizado, están diseñados y administrados principalmente para proteger la salud humana y ambiental. Si bien sus beneficios son ampliamente reconocidos, hay otros aspectos de esta infraestructura y tecnologías asociadas que no son tan obvias y, por lo tanto, menos reconocidas, sin embargo, afectan a las comunidades y al entorno circundante.

En una era en la que existe una creciente preocupación por el impacto local y global de nuestras estrategias actuales de gestión ambiental, y la necesidad de reducir los problemas de saneamiento, las enfermedades y la pobreza, existe una mayor necesidad de desarrollar tecnologías de tratamiento de aguas residuales más apropiadas y ambientalmente responsables. Por ende, el objetivo principal de esta investigación es determinar valores per cápita de cargas orgánicas, nutrientes y patógenos en el sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR) en la ciudad de Jinotega, con la finalidad de diagnosticar la calidad operacional de cada una de las fases de tratamiento del sistema, lo que ayudará en un futuro a la realización de mejoras y nuevas medidas, para la operación y el mantenimiento del STAR.

El sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Jinotega se encuentra ubicado en las coordenadas latitud: 13°5' 27.741" y longitud: 86°0' 8.45". El sistema trabaja por medio de lagunas de estabilización del tipo facultativa, es decir que operan en la primera parte como lagunas anaerobias luego una etapa con lagunas facultativas para terminar en lagunas de maduración. El efluente generado del

STAR es vertido al lago de Apanás. El STAR está compuesto por dos módulos de tratamiento, cada módulo está constituido de la siguiente manera: Laguna anaerobia + Laguna facultativa, en el caso del pretratamiento y la laguna de maduración son compartidos por ambos módulos. La fase experimental se realizó en el módulo B porque el módulo A actualmente se encuentra en mantenimiento.

Como primer paso se hizo una evaluación funcional del STAR, para ello se realizó una visita de campo el día 22 de febrero del corriente año, con el objetivo de hacer un reconocimiento del sitio, conocer el arreglo del sistema y las medidas existentes para su correcta operación, el recorrido fue acompañado por técnicos de la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios (ENACAL) Jinotega. Luego se procedió a evaluar las variaciones de caudal en afluente y efluente del sistema de tratamiento, a través de aforos establecidos durante siete días, para obtener un mejor resultado en la variable de caudal.

Como segundo paso se realizó la toma de muestras compuestas por períodos de 24 horas, que sirvieron para el análisis de laboratorio y posterior determinación en las concentraciones de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), fósforo (P) y coliformes totales/fecales, lo que ayudó a analizar el cumplimiento con las normativas ambientales en cuanto a los límites máximos permisibles de descarga de aguas residuales a cuerpos de agua.

Como tercer paso se determinaron los períodos de retención del sistema, así como calcular la eficiencia de cada fase de tratamiento.

Por último, se realizó una estimación en la emisión del metano (CH_4), mediante las directrices ambientales de la IPCC versión 2006, con el fin de determinar la contribución del sistema de tratamiento, en la producción de gases de efecto invernadero, siendo este un factor importante en el cambio climático en la actualidad.

1.2. Antecedentes

En el año 1995, el gobierno de la República Federal de Alemania a invitación de ENACAL (entonces INAA), realizaron acuerdos de estudios que permitirían la construcción de sistemas modernos de saneamiento de aguas residuales para las ciudades de Matagalpa y Jinotega (Kreditanstalt Für Wiederaufbau, 2016).

En el año 2000 se dio inicio a las obras del STAR, la cual disponía de tratamiento preliminar que constaba de un desarenador (ubicado a cinco kilómetros fuera del sistema), rejillas, así como una canaleta Parshall para medir el tirante de agua que sirvió para el cálculo de caudal, el arreglo de la planta está compuesto por dos lagunas primarias, más dos lagunas secundarias y finalmente una laguna terciaria, las cuales en conjunto trabajan en serie (las lagunas primarias y secundarias trabajan en paralelo). En el 2003 se realizó la creación de un manual de mantenimiento para dar a conocer al operador los conocimientos básicos necesarios en la administración del sistema, y las instrucciones específicas para el manejo de estas instalaciones.

En el año 2005 comenzó operaciones, con la capacidad de tratar diariamente 45.3 L/s, llevándose registro de los parámetros fisicoquímicos como son el pH (tres veces al día), DQO y DBO₅ mensualmente; se esperaba una segunda etapa en el año 2010, la cual constaba de la adición de una laguna primaria (anaerobia), una laguna secundaria (facultativa) y una laguna terciaria (maduración), las cuales hasta el día de hoy no se han ejecutado obras.

En el año 2012, la sociedad para la cooperación internacional (GIZ) a través del Programa de Asistencia Técnica en Agua y Saneamiento (PROATAS) realizaron el diagnóstico general de 35 sistemas de tratamiento de aguas residuales de ENACAL, donde se incluía el STAR de Jinotega, en el cual se obtuvo una concentración de DBO₅ en el afluente del sistema de 577.33 mg/L y 84 mg/L en el efluente, como resultado de la valoración se tiene que el STAR de Jinotega, requiere de una inversión que implica la ampliación o aumento de capacidad de tratamiento y por ende una inversión en infraestructura importante, debido a las carencias en la

remoción en otros parámetros evaluados (SST, coliformes fecales) y el aumento en su caudal de diseño.

En el 2016 se dio inicio al mantenimiento del módulo B del STAR, el cual constaba específicamente en la extracción de lodos, y a finales del año 2017 se comenzó con el mantenimiento del módulo A, el cual se mantienen hasta la actualidad, debido a los atrasos provocados por las condiciones climáticas en la zona, ya que Jinotega cuenta con precipitaciones constantes a lo largo del año, según ENACAL.

1.3. Justificación

Los sistemas de tratamiento de agua residual, en el país en la mayoría de los casos tienen una escasa supervisión y mantenimiento, por lo que los patógenos y los componentes químicos, como la materia orgánica que agota el oxígeno y el fósforo, no se eliminan antes de que el agua tratada vuelva al ambiente. En trabajos de investigación sobre carga contaminantes para Matagalpa, Estelí, Somoto y Sébaco, se ha demostrado que la descarga de aguas residuales provenientes de estos sistemas de tratamiento, tienen todavía altas concentraciones de componentes químicos que llevan a una entrada excesiva de nutrientes en los cuerpos de agua receptores, lo que lleva a un problema de calidad del agua (Larios y Pravia, 2018; Blandón y Valenzuela, 2018; Betanco, 2018; Pinell y López, 2017).

La descarga de aguas residuales provenientes del STAR de Jinotega al lago, no solo aumenta las concentraciones de nutrientes y cargas orgánicas, sino que también está provocando cambios adversos en la biota del cuerpo de agua. Esto debido a que no existe un análisis de las cargas contaminantes que están siendo vertidas. Estos impactos negativos, afectan en gran medida la sostenibilidad local y municipal, debido a la importancia que tiene el lago desde una perspectiva económica y social.

Es por ello, que este estudio sirvió para determinar las eficiencias operacionales en cada unidad de tratamiento del STAR de Jinotega, mediante los aforos de caudales que ayudaron a la determinación de los períodos de retención; y a través de la toma de muestras compuestas, se determinaron las concentraciones de cargas contaminantes que son removidas a lo largo del sistema. Siendo estos datos de gran importancia a futuro para la toma de decisiones que ayuden en la ejecución de obras de mantenimiento, mejoras y expansión dentro del sistema, que brindará una mejor calidad operacional y por ende menos impactos negativos al ambiente.

En la actualidad, la mayor parte de las evaluaciones realizadas en los sistemas de tratamiento, es notable que la descarga de los efluentes a los cuerpos receptores está superando la capacidad de autodepuración (Larios y Pravia, 2018; Blandón y

Valenzuela, 2018; Betanco, 2018; Pinell y López, 2017). Sin embargo, en muchas de estas investigaciones no se pudo realizar una cuantificación de concentraciones de nutrientes, las cuales pueden provocar en el cuerpo de agua un proceso de eutrofización, que desencadena el crecimiento de algas, que impiden la penetración de la luz solar creando una alteración en el ecosistema acuático.

De tal manera que en esta investigación, se pretende dar un enfoque al potencial impacto que pueden generar las concentraciones de nutrientes que son vertidas al lago de Apanás; así como también las cargas de patógenos que son desencadenantes de enfermedades que ponen en riesgo la salud humana, tomando en consideración las normativas nacionales y sus parámetros de vertido.

Según el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA), en su tercera comunicación de cambio climático, se registran estudios de Gases de Efecto Invernadero (GEI) desde el año 2000 al 2010, donde se incluyen los sistemas de tratamientos de aguas residuales, debido a que ha transcurrido un tiempo considerable desde el último estudio, y a la importancia que representa la emisión de GEI por parte de estos sistemas, fue necesario realizar un seguimiento que ayude a obtener datos con forme a las condiciones actuales.

Por ello, se determinó la emisión de los GEI, basándonos principalmente en el metano, con respecto a los valores de población y los resultados per cápita de carga orgánica. Por otra parte, con esta investigación se dio un paso en la determinación del impacto, que pueden generar en el ambiente los sistemas de tratamiento basados en lagunas de estabilización, lo que puede contribuir al análisis integral de los beneficios e impactos generados por estos sistemas, ya que estos son los de mayor uso para el tratamiento de las aguas residuales en Nicaragua.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar valores per cápita de carga orgánica, nutrientes y patógenos en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) en la ciudad de Jinotega.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Determinar las variaciones de caudal en afluente y efluente del sistema de tratamiento.
2. Determinar el funcionamiento operacional de las lagunas basado en período de retención y cargas aplicadas.
3. Estimar eficiencias puntuales por cada fase de tratamiento y cargas contaminantes que conforman el STAR.
4. Analizar las concentraciones obtenidas de los muestreos compuestos para verificar el cumplimiento de los límites máximos permisibles de vertido del decreto 21-17 y NTON 05-027-05.
5. Realizar simulación de los gases de efecto invernadero en el STAR de Jinotega en base a las directrices ambientales del IPCC versión 2006.

CAPÍTULO II

Descripción del sitio de estudio

***“El agua es la sangre de la naturaleza”
-Leonardo Da Vinci.***

CAPITULO II. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

2.1. Área de estudio

Este estudio se desarrolló en el STAR de la Ciudad de Jinotega, cabecera del departamento del mismo nombre con una población urbana de 53, 265 habitantes en el año 2017. Se ubica en un valle a una altitud de 1,003.87 msnm y con coordenadas en latitud: 13°5' 27.741" y Longitud: 86°0' 8.45".

Cuenta con un clima fresco a temperatura promedio de 25°C a una distancia de 142 km de la capital Managua.

El municipio limita:

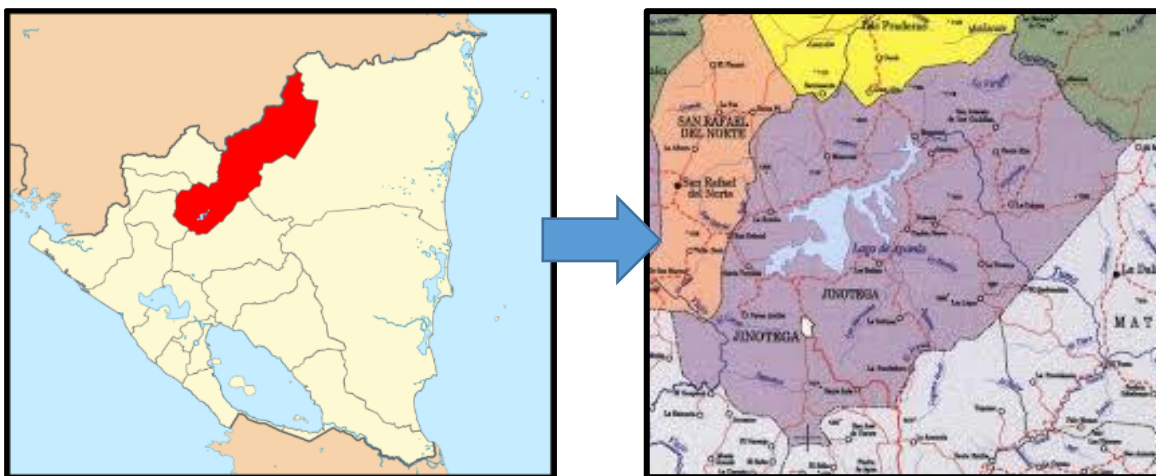
Al Este con los municipios de: El Cuá y el Tuma – La Dalia.

Al Oeste con los municipios de: La Trinidad, San Rafael del Norte.

Al Norte con el municipio de: Santa María de Pantasma.

Al Sur con los municipios de: Matagalpa y Sébaco.

Ilustración 1.- Macro localización



Fuente: Adaptado de Google, 2019

Ilustración 2.- Micro localización



Fuente: Adaptado de Google Maps, 2019

El sitio de estudio se encuentra ubicado a cinco kilómetros aproximadamente del centro de la ciudad de Jinotega en la salida noreste hacia el llano la Cruz, específicamente en la comunidad Las Conchitas.

2.2. Servicios básicos de la ciudad de Jinotega

2.2.1 Manejo de residuos sólidos

El problema de la basura ha aumentado con el incremento de migración del campo hacia la ciudad, así como por los malos hábitos de muchos ciudadanos, lo que ha generado la producción y acumulación de desperdicios en distintos puntos de Jinotega. De acuerdo a un estudio, cada una de las más de 50 mil personas que habitan en la ciudad, produce un promedio de 0.47 kilogramos de basura (PRENSA, 2006).

El servicio de recolección y tratamiento residuos sólidos de la ciudad de Jinotega, presta servicios de recolección de basura a 36 barrios, lo que representa el 90 por ciento de cobertura, este servicio se brinda únicamente en el casco urbano; según el diario la prensa (2006), la ciudad produce 128 metros cúbicos de desechos sólidos, más 24 que producen los puestos fijos como el hospital, centros de salud, mercado y otros negocios.

El costo por el servicio a cuotas mensuales en esta ciudad esta diferenciada en categorías ver tabla N°1, que van entre los C\$ 15 a los C\$ 1000.

Tabla 1.- Recolección de residuos sólidos

Procedencia	Categoría	Costos
Domiciliares	Categoría a	C\$ 50
	Categoría b	C\$ 30
	Categoría c	C\$ 15
Comerciales, restaurantes y otros similares	Categoría a	C\$ 500
	Categoría b	C\$ 300
	Categoría c	C\$ 150
Instituciones	Categoría a	C\$ 300
	Categoría b	C\$ 200
	Categoría c	C\$ 100
Industrias	Categoría a	C\$ 1000
	Categoría b	C\$ 500
	Categoría c	C\$ 250

Fuente: Alcaldía Municipal de Jinotega (2008)

2.2.2 Agua y saneamiento

La ciudad de Jinotega es abastecida por medio de fuentes subterráneas y cuenta con siete pozos con una capacidad de 400 m³ h, el agua es extraída de los pozos por medio de bombas sumergibles, esta agua es bombeada a una estación de bombeo ubicada en el llano la cruz, la cual está equipada con cuatro bombas de turbina con una capacidad de 520 m³h. En dicha estación el agua recibe el tratamiento que se le da para potabilizarla por medio de cloro gaseoso, luego de este proceso el agua es bombeada a los tanques de almacenamiento que rodean la ciudad y luego desde estos es distribuida a la población por medio de gravedad.

- **Tanques de almacenamiento**

En ENACAL existen nueve (9) tanques de almacenamiento, dos en la estación de relevo con una capacidad de 1250 m³ y siete en las periferias de la ciudad con una capacidad de 3147 m³.

La distribución está dividida en cinco subsistemas con tuberías de diámetros desde los 1 ½ plg, hasta las 8 plg en diferentes sectores de la red de distribución, con una longitud total de 114.4 Km, con materiales de PVC y de HFD, y cuenta con una cobertura del 100%.

Se cuentan con una red de recolección de alcantarillado sanitario de aproximadamente 76 Km, con materiales de Rib-loc, HFD, PVC Y concreto, con 1408 pozos de visita.

2.3. Actividad económica

A nivel primario la mayoría de la población del Municipio está dedicada a la actividad agropecuaria, siendo este rubro un gran generador de divisas importante para el país, la producción principalmente consiste en café, frijoles, maíz y hortalizas, este sector lo conforman principalmente pequeños y medianos productores los cuales manejan sus tierras de forma empírica y en la mayoría de los casos no cuentan con ningún tipo de financiamiento.

Las actividades secundarias son muy reducidas, solo el 11% de la población económicamente activa se encuentra ocupada en estas actividades, la industria existente en el municipio son los beneficios de café los cuales solamente están siendo utilizados como bodegas, un aserrío, la represa hidroeléctrica del lago de Apanás (que es la industria más importante de Jinotega), dos industrias alimenticias y dos láctea. Por otro lado en el municipio se encuentra una pequeña industria de tipo artesanal, siendo las microempresas de panificación, cerámica negra, calzado y muebles. La caza y la pesca a pequeña escala es otra fuente de ingresos para las comunidades del municipio.

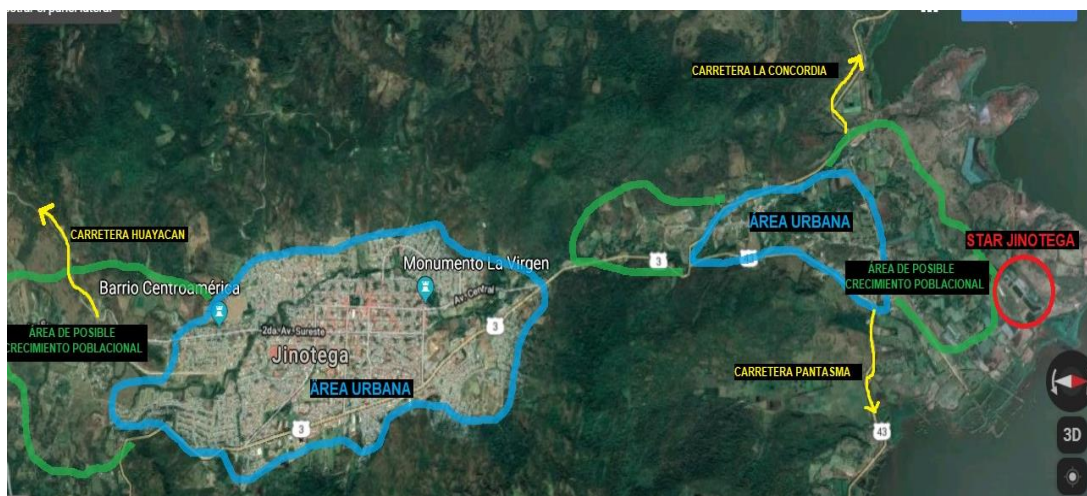
2.4. Evaluación de emplazamiento de acuerdo a la NTON 05-027 05

La ubicación de los Sistemas de tratamiento de Aguas Residuales debe cumplir con todos los criterios establecidos en el Acápite 6 de la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense para regular los STAR y sus reúsos (NTON 05-027 05). A continuación se enlistan los criterios a seguir:

1. La ubicación de los STAR debe tomar en cuenta los planes de desarrollo urbano de la Municipalidad o localidad.

El plan de ordenamiento territorial de la ciudad de Jinotega se considera como una zona de crecimiento urbano el área donde se encuentra ubicado el STAR esto ocasiona preocupación por parte de los ciudadanos por los olores que emite el STAR , Ver ilustración 3.

Ilustración 3.- Análisis de amenaza y crecimiento poblacional en la ciudad de Jinotega



Fuente: Elaboración propia

2. El terreno donde se construya un STAR no debe ser un área inundable. No se permite la construcción en pantanales, humedales (swampoo), marisma y similares.

El STAR se encuentra ubicado en un área que presenta un grado de inclinación del 2% por encima del lago, evitando acumulación del líquido en el terreno, además se

han construidos taludes en los alrededores, el tipo de suelo permite la infiltración de agua para que este se mantenga escurrido en poco tiempo.

3. El área del terreno donde se ubique o se instale un STAR debe tener una pendiente menor de 5%.

De acuerdo a la NTON 05-027 05, cumple con este requisito ya que se encuentra ubicada en una zona del 2 % que permite el drenaje de las aguas pluviales.

4. La instalación o construcción de los STAR deben estar ubicados a sotavento de cualquier actividad donde haya permanencia de personas por más de 8 horas, de tal manera que el aire circule de las actividades hacia el sitio de la ubicación del STAR y no lo contrario.

La construcción de este sistema cumple con este punto ya que se encuentra a sotavento.

5. La distancia de separación entre la instalación o construcción de cualquier STAR, y viviendas, fuente de abastecimiento y nivel freático se establece en la tabla 1.

Tabla 2.- Ubicación de los sistemas de tratamientos de aguas residuales

Unidades de tratamiento	Pozos individuales de agua para consumo domestico	Lindero de propiedad	Viviendas o zonas pobladas	Nivel freático
Lagunas de estabilización	Mayor de 200 metros	Mayor de tres metros	Mayor de 300 metros	Mayor de 300 metros
Lagunas facultativas y aerobias	Mayor de 200 metros	Mayor de 20 metros	Mayor de 1000 metros	Mayor de 1000 metros
Lagunas de maduración		Mayor de cinco metros		

Fuente: NTON 05-027-05 (2005)

El STAR de acuerdo a los puntos abordados en la tabla N° 2, su construcción cumple con la normativa, pero en los últimos años se han construido casas quedando el STAR a escasos 500 metros de una zona aledaña.

6. En el caso de nuevas actividades o proyectos que requieran instalarse cerca del área de influencia de un STAR en operación deben de registrarse por los criterios establecidos en la presente normativa y los criterios técnicos que las autoridades competentes dictaminen.

En el plan de ordenamiento territorial no se tomó en cuenta la ubicación del sistema con respecto al crecimiento urbanístico, por lo tanto es posible que haya incomodidades de los pobladores aledaños al STAR presentándolas a las autoridades locales.

7. La distancia mínima entre los STAR y campos de pozos de abastecimiento de agua potable debe ser en un radio de 1000 metros medidos desde el pozo más cercano.

El pozo de abastecimiento de agua potable más cercano al STAR se encuentra en un radio mayor de 1000 metros en la comunidad de Apanás exactamente en las conchitas.

8. Todo STAR que se ubique en áreas protegidas debe solicitar la autorización o permiso ambiental al MARENA según corresponda. En el caso de áreas protegidas con planes de manejo, el sitio de ubicación de los STAR deberá registrarse según la zonificación y su normativa correspondiente.

El STAR cumple con la normativa en este inciso, existe área protegida la cual es el lago de Apanás ubicado a 300 metros del sistema pero se cuenta con la autorización de MARENA.

9. La distancia mínima entre un STAR y esteros (estuarios), mar debe ser de 100 m de la línea máxima de crecida, en caso contrario el MARENA o INAA según su competencia establecerá su autorización en dependencia del tipo de sistema.

El STAR se encuentra ubicado en la zona central de Nicaragua, la cual esta retirada de las zonas costeras del pacifico y mar caribe, por ello en este inciso el STAR cumple.

10. Cuando la descarga o disposición final del efluente de un STAR se requiera en Aguas superficiales, debe ser autorizada por el MARENA según el tipo de corriente, uso del recurso y actividades que se realicen en el punto de descarga. En el caso de los ríos y quebradas se debe tomar en cuenta el uso y las actividades que se realicen aguas abajo.

La disposición final del efluente del sistema es arrojado al lago de Apanás, algunas personas han hecho zanjas para desviar estas aguas hacia sus riegos, en el lago se da la pesca y cabe mencionar que es un lugar turístico; no tiene cumplimiento con la normativa por lo que el MARENA no lo autoriza.

11. La distancia entre un STAR y un aeropuerto, aeródromo o una terminal aérea, debe ser establecida por el Ministerio de Transporte e Infraestructura.

La ciudad de Jinotega no cuenta con un aeropuerto, por ello el STAR cumple con la normativa.

12. La instalación de un STAR con respecto a la profundidad del manto freático debe ser como mínimo de 2 metros a partir del fondo del STAR y cumplir con las especificaciones diferentes:

- a. Para suelos limosos y limo arenoso se debe proceder a impermeabilizar y compactar el área al 95% próctor standard.
- b. En aquellos casos en que la profundidad del nivel freático sea menor de 2 metros MARENA e INAA, según su competencia autorizará la viabilidad del sistema.

13. En aquellos casos en que la profundidad del nivel freático sea menor de 2 metros MARENA e INAA, según su competencia autorizará la viabilidad del sistema.

Debido a que no existe un estudio realizado para la valoración y profundidad del manto freático en la zona, se desconoce el estado actual del acuífero de Jinotega, por lo tanto el inciso 12 y 13 del Acápito 6 de la NTON 05-027 05 no se puede estimar el cumplimiento o no de estos criterios.

2.5. Descripción de la planta

El sistema de tratamiento de la ciudad de Jinotega, posee un tratamiento preliminar (desarenador) que se encuentra fuera de la planta, el sistema consta de un tratamiento primario, secundario y terciario, el objetivo es mejorar la calidad del agua residual proveniente del alcantarillado sanitario, para que su efluente pueda ser vertido al cuerpo receptor (Lago de Apanás).

Esta planta trabaja a través de dos módulos que están comprendidos por lagunas anaerobias que trabajan en paralelo entre ellas, seguidas de dos lagunas facultativas que trabajan en serie con estas lagunas anaerobias y para finalizar el tratamiento, una laguna de maduración donde desemboca el efluente de ambos módulos.

Se trabajó únicamente con el módulo B porque actualmente el módulo A se encuentra en mantenimiento ver esquema N° 1. A continuación se describe cada unidad de tratamiento del STAR:

2.5.1. Tratamiento preliminar

Esta fase está compuesta por unidades que trabajan, en este caso por separado para dividir y eliminar sólidos de gran tamaño (plástico, trapos, animales, hules, etc.) y arenillas, estas preparan el agua residual para que puedan recibir un tratamiento subsiguiente sin perjudicar y sin obstruir tuberías; sirven también para minimizar algunos efectos negativos al tratamiento y la eficacia de estos, tales como grandes variaciones de caudal y de composición.

Las unidades que conforman el pre tratamiento en el STAR de la ciudad de Jinotega, será detallado en el siguiente esquema:

Esquema 1.- Tratamiento preliminar



Fuente: Elaboración propia

- Desarenador

El objetivo con el que fue diseñado y construido es para remover partículas discretas (arena, tierra, semillas, etc.) que no deben ingresar a las lagunas porque provocan desgaste en las tuberías, acumulación en la entrada y salida de estas, las obstrucciones dan lugar a sobrecargas; el material removido sedimenta por su propio peso debido a la acción de gravedad.

Dispone de dos cámaras en paralelo con el propósito de mantenimiento, para esto, también cuenta con compuertas de fibra de vidrio a la entrada y salida de cada una.

El desarenador está ubicado fuera del sistema específicamente a cinco kilómetros, esto por decisiones de los diseñadores. Actualmente se encuentra en buenas condiciones y con un procesamiento operacional aceptable debido al mantenimiento que se le da, por ser una estructura pequeña, la remoción de arena en este desarenador es manual; para evitar la sedimentación de materia orgánica se remueve la arena dos veces al día; una por la mañana y otra por la tarde. De esta manera se desprende la mayor parte de la materia orgánica sedimentada con la arena.

Este desarenador cuenta con una caja de captura de arena, el fin de esta unidad, es de reposo para las arenas que se extraen del desarenador, para llegar a la etapa final la cual es su secado, esta arena es utilizada en los adoquinados de esta ciudad.

- Canal de rejas

Las rejas se han diseñado con el objetivo de retener material grueso o sólidos flotantes, que ingresan con las aguas residuales; estos materiales atrapados son extraídos tantas veces al día como sea necesario para permitir el libre flujo del líquido en canales; los residuos como son: botellas, bolsas de plástico, trapos, papeles, palos, ramas, cáscaras, hojas, hules, fibras, desperdicios varios, etcétera.

Esta unidad consta de dos cámaras con un ancho de 0.40 m cada una, se encuentran con un ángulo de 60° respecto a la horizontal. El espaciamiento entre los dos cámaras metálicas es de 0.30 m, el espacio entre reja y reja es cuatro centímetros (0.04 m).

Esta estructura cuenta con un aliviadero lateral que opera en casos de emergencia, cuando por alguna razón, la pérdida de carga en las rejas se encuentra por encima del nivel de rebose del aliviadero. Este rebose descarga al vertedero de demasías, detrás de la reja.

Para el mantenimiento de rejas se utilizan dos compuertas que permite cerrar el canal principal delante y detrás de cada una, aislando de esta manera cada cámara, mientras se da el mantenimiento a una reja, el afluente de aguas crudas ingresa por la otra.

El sistema de rejilla cuenta con una pileta, esta estructura fue diseñada con el propósito de mantener en reposo los residuos que quedan atrapados en las rejillas, esta es lavada cuatro veces al día para tratar de disminuir las moscas y la presencia de animales carroñeros como, son depositados en una esquina baldía de la propiedad para su escurrido ya una vez secos son quemados en el lugar.

- Estructura emergencia

Inmediatamente aguas abajo de la estructura de rejas se encuentra un vertedero de demasías para el drenaje de los caudales excedentes a los 45.3 litros por segundo que es el caudal promedio diario con el que fue diseñado en el año 2005, cabe señalar que este desde que inició operaciones, el caudal ha estado siempre en exceso en horas pico.

Este vertedero de rebose descarga a través de un canal abierto al lago Apanás.

- Elemento de medición

Seguido de la estructura de emergencia se localiza un medidor Venturi con un ancho de garganta de 0.229 m. Esta estructura mide el tirante de agua para determinar el caudal. Las mediciones se realizan a través de una escala graduada en centímetros (0.72 m) localizada en una de las paredes del medidor.

Este funciona de forma adecuada y presenta buenas condiciones debido al mantenimiento semanal que se le da por parte los operadores, el cual es retirar el exceso de costras.

Una observación importante es que se realizan lecturas diarias cada hora durante todo el día.

- Estructuras de repartición de caudal

Son estructuras de concreto fijas que permiten tener un control o servir de reguladores sobre el caudal que ingresa a las lagunas explícitamente en períodos de lluvia; ya que cuentan con una compuerta de fibra de vidrio que tiene el propósito de aislar las unidades de tratamiento, para realizar alguna actividad de mantenimiento (como se encuentra actualmente).

2.5.2. Tratamiento primario

Este sistema de tratamiento de aguas residuales tiene dos módulos de lagunas de tipo anaerobias, actualmente se encuentra en mantenimiento el módulo A de las lagunas ver esquema N° 2, estas trabajan en paralelo, el agua llega hacia ellas a

través de canales de concreto fijos que permiten una distribución proporcional del caudal en relación al área de cada una de las unidades.

El ambiente de estas lagunas se caracteriza por la ausencia de oxígeno y en estas condiciones la laguna toma una coloración oscura debido a la presencia de sulfuros que impiden la penetración de la luz solar y por lo tanto el desarrollo de algas.

En esta fase tiene la finalidad de remover los sólidos sedimentables y en suspensión por medios de procesos biológicos.

- Lagunas primarias

Esta fase de tratamiento está compuesta por dos unidades en paralelo, las dimensiones de cada una son de 41.3 m de largo x 40.8 m de ancho y 3.3 de profundidad, teniendo un volumen líquido de 5,490 m³, un área superficial promedio de 0.34 ha, comprendiendo un área de 1,685 m².

Cuentan con estructuras de ingreso, el flujo es conducido por un canal independiente a una laguna anaerobia mientras que el resto del flujo continúa hacia la anaerobia que esta aguas abajo, son canales cubiertos en la superficie y están conformados por una sección rectangular de concreto de sección variable.

El efluente de las lagunas es conducido por una caja de concreto reforzado que tiene una salida ahogada para evitar que el material flotante pase a las lagunas facultativas, una baranda de hierro galvanizado para protección del personal de operación, un vertedero rectangular con cresta de fibra de vidrio y borde horizontal, una regla graduada (0.40 m) para medición de niveles; para fines de mantenimiento cuenta con una rampa que sirve de acceso al fondo de las lagunas.

Están lagunas trabajan a través de procesos biológicos que se desarrollan en condiciones anaerobias sin oxígeno disuelto. Debido a que la cantidad de oxígeno que demanda la carga de materia orgánica, excede la producción del mismo que pudiera ser obtenido por la fotosíntesis.

Se presenta un proceso físico de separación por gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo, y la parte menos densa sube formando una capa flotante.

En el mecanismo de degradación se dan dos etapas: la primera etapa de fermentación ácida, esta es llevada a cabo por organismos formadores de ácidos que atacan las sustancias orgánicas y las transforman en compuestos orgánicos más simples y ácidos orgánicos.

La segunda etapa es llevada a cabo por un grupo de organismos estrictamente anaerobios que utilizan los productos intermedios de la etapa anterior para producir gases como el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2), básicamente.

Debido a las altas cargas orgánicas aplicadas, el efluente de estas lagunas presenta gran porcentaje de materia orgánica que requiere de un tratamiento adicional.

Esta laguna se encuentra en buen estado debido al mantenimiento que se le dio en el año 2016, sus taludes presentan un poco de crecimiento de maleza pero es fumigado cada 15 días por los operadores, además la maleza que no logra quemarse con el veneno es podada.

Esquema 2.- Tratamiento primario



Fuente: Elaboración propia

2.5.3. Tratamiento secundario

Este sistema de tratamiento tiene dos módulos de lagunas de tipo facultativas que trabajan en serie con las lagunas anaerobias, como se mencionó en el tratamiento primario el módulo A se encuentra en mantenimiento por lo que una de estas lagunas está deshabilitada para dicha operación ver esquema N° 3, estas lagunas facultativas trabajan en paralelo.

En esta fase tiene la finalidad de reducir DBO5 a través de las bacterias anaerobias, aerobias y facultativas.

- Lagunas secundarias

Las estructuras de ingreso del flujo de agua a estas lagunas son canales abiertos, con una pendiente mínima apoyadas sobre el talud de entrada, consta además de una losa de concreto reforzado sobre el fondo de la laguna que previene la erosión del caudal de ingreso, y una pantalla deflectora que tiene el propósito de disminuir cortocircuitos desviando el caudal 90° hacia la derecha e izquierda.

Sus estructuras de salida para el flujo de agua son similar a la de las lagunas anaerobias; poseen un vertedero de fibra de vidrio, una regla de medición (0.40 m), una salida ahogada y una baranda de hierro galvanizado para protección del personal de operación.

Estas lagunas tienen una profundidad menor con respecto a las lagunas anaerobias, la cual es de 1.6 m, con un ancho de 46.5 m y una longitud de 120.2 m cada una, contando con un volumen líquido de 16,220 m³, un área de 5,589 m², área superficial promedio de 1.12 ha, el diseño permite el funcionamiento de manera facultativa, gracias a la remoción de sólidos que genera el tratamiento anterior.

Estas lagunas presentan una variación de oxígeno de acuerdo a la profundidad y hora del día, el proceso principal de estas lagunas ocurre en la superficie (aerobias) y en el intermedio de estas (facultativo), cuenta con oxígeno disuelto que disminuye con la falta de exposición solar y la profundidad; en el fondo un estrato de degradación anaerobia.

En estas lagunas es normal ver la formación de algas que se da debido a la presencia de la luz solar y bajo la acción de un proceso fotosintético utilizan el CO_2 proveniente de la oxidación bacteriana, como fuente de carbono para la formación de nuevas algas, al mismo tiempo liberan el oxígeno presente en la molécula de CO_2 .

Esta laguna presenta en su afluente y efluente acumulación de lodos y sólidos arenosos impidiendo una buena mezcla de este afluente con el resto de la laguna. Actualmente en esta laguna facultativa se puede observar zonas muertas, es decir, acumulación de material flotante (nata) que impiden la fotosíntesis en el proceso de depuración; esto se debe a que las estructuras de repartición de caudal están muy cerca del canal por donde ingresa el caudal.

Por el problema que presenta esta laguna se puede entender que la fase preliminar y primaria tienen deficiencias, sumado a que por el mantenimiento que se le está dando al otro módulo de lagunas los lodos están siendo depositados en esta, los sólidos flotantes y gruesos están causando problemas nocivos en la operación de las lagunas; estos ayudan a la formación de natas que producen malos olores y sirven como focos para la reproducción de insectos y producen condiciones desagradables a la vista.

Sin embargo, pese a las condiciones anaerobias anormales que se presentan en esta laguna y de la combinación de material flotante que se puede combinar con la producción de H_2S , estas no generan color rojizo en la apariencia de las natas.

Esquema 3.- Tratamiento secundario



Fuente: Elaboración propia

2.5.4. Tratamiento terciario

Este tratamiento cuenta únicamente con una estructura donde recibe los efluentes de los dos módulos del tratamiento secundario, actualmente solo está recibiendo el efluente del módulo B, esta fue diseñada con el propósito fundamental de reducción del número de organismos patógenos; se caracterizan por tener un corto período de retención. El objetivo primordial de estas lagunas es producir efluentes de alta calidad.

- Laguna terciaria

La estructura de ingreso para el afluente de esta laguna de maduración es a través de un canal de concreto reforzado abierto, cuenta con una losa de concreto reforzado sobre el fondo de la laguna que previene la erosión del caudal de ingreso.

A diferencia de las salidas de las lagunas anaerobias y facultativas, la de maduración cuenta con dos cajas de concreto, dos vertederos cada uno para el control máximo de nivel de aguas en la laguna pero actualmente solo se encuentra

en funcionamiento uno de estos. El efluente de aguas tratadas de esta fase descarga a un canal de salida de sección rectangular. Este canal cruza el dique de la laguna y el camino de mantenimiento, y está conectado a la estructura de salida y descarga al lago de Apanás.

Esta laguna es la más grande en cuanto a longitud 206.3 m, tiene una profundidad menor con respecto a las lagunas anaerobias y facultativas con 1.2 m, un ancho de 43.3 m, contando con un volumen líquido de 10,020 m³, un área de 8,932.8 m², área superficial promedio de 0.89 ha, esta estructura está diseñada para un tiempo de retención de 2.5 días. Posee taludes de piedra bolón con mezcla de suelo, en la base de los taludes está conformada de material selecto de 60 cm.

Actualmente la laguna presenta un deterioro en los taludes en su condición física, el deterioro de la malla en los taludes de esta y debido a la falta de mantenimiento presenta deficiencias en el funcionamiento de su condición operacional, por la acumulación de lodos que se pueden ver en la superficie que afectan los períodos de retención hidráulicos por lo que las eficiencias de remoción no son las deseadas.

Esquema 4.- Tratamiento terciario



Fuente: Elaboración propia

2.5.5. Efluente general del STAR de Jinotega

Al final del tratamiento de todo el sistema su efluente es descargado por dos canales rectangulares uno proveniente del vertedero de demasías localizado en el tratamiento preliminar, el cual sus aguas son completamente crudas, este se une con el canal que proviene de la laguna de maduración, este desemboca al lago Apanás a través de una canal de concreto de 1.2 m de ancho y unos 50 m de longitud hasta el lago.

En el esquema N° 5. Se presentan la etapa de conducción y vertido de las aguas tratadas.

Esquema 5.- Efluente general del STAR



Fuente: Elaboración propia

2.5.6. Parámetros operacionales

Tabla 3.- Parámetros operacionales

Variable	Frecuencia	Observaciones
Caudal: <ul style="list-style-type: none"> Afluente al sistema 	Se toma el tirante diario gracias a la canaleta Parshall que posee	Registro continuo
<ul style="list-style-type: none"> Efluente del sistema 	No se toman debido a que no existe un elemento de medición como en el afluente	
Parámetros		
1- Físico- químicos		
Temperatura del agua	Tres veces al día	Se mide en la entrada del sistema
pH	Tres veces al día – actualmente no se están tomando debido a que el potenciómetro se encuentra en mal estado	Se mide en el exterior de la caja de salida de A1 y F1
Color: <ul style="list-style-type: none"> En cada unidad 	Diario	Diario se realizan las observaciones en las lagunas
O.D: <ul style="list-style-type: none"> En cada unidad 	Una vez por mes	Se ha realizado constantemente desde su operación
D.B.O. : <ul style="list-style-type: none"> Afluente al sistema Efluente del sistema 	Semestralmente	Se realizan en enero y julio
Sólidos suspendidos <ul style="list-style-type: none"> Afluente al sistema Efluente al sistema 	Semestralmente	Se realizan en enero y julio
Sólidos sedimentables <ul style="list-style-type: none"> Afluente y efluente del sistema 	Semestralmente	Se realizan en enero y julio

Variable	Frecuencia	Observaciones
Sólidos disueltos <ul style="list-style-type: none"> Afluyente y efluente del sistema 	Semestralmente	Se realizan en enero y julio
Nitrógeno <ul style="list-style-type: none"> Afluyente al sistema Efluente al sistema	Semestralmente	Se realizan en enero y julio
Fósforo total	Semestralmente	Se realizan en enero y julio
2- Biológicos Coliformes (total y fecal) : <ul style="list-style-type: none"> Afluyente del sistema Efluente del sistema 	Semestralmente	Se realizan en enero y julio

Fuente: DYWIDAG (2003)

2.5.7. Condiciones de mantenimiento

Tabla 4.- Condiciones de mantenimiento

Ubicación	Punto	Mantenimiento	Frecuencia
Desarenador (unidad ubicado fuera del STAR)	Operación de compuerta	Cerrar las compuertas en la entrada y salida de canal a limpiar para evitar la llegada de agua	Semanal o antes si lo requiere
	Abrir compuerta de drenaje	Se deberá abrir la compuerta localizada cerca de la tolva (abertura entre 20 y 30 %).	
	Limpieza de cámara de sedimentación	Desprender, remover y palear el material acumulado en el fondo y en las paredes de la cámara, utilizando rastrillo y pala. Continuar con esta acción permitiendo la evacuación de arena y lodos por la tubería de drenaje, si comienza a salir más aguas que arena cerrar la compuerta y esperar un minuto, luego abrir y continuar.	
		Raspar el fondo del canal y dejarlo completamente limpio	
	Cerrar la compuerta de drenaje	Una vez limpiado el canal se deberá cerrar la compuerta abierta.	
	Operación compuerta final	Cerrar la compuerta que está a la salida del desarenador y seguidamente la compuerta a la.	

Ubicación	Punto	Mantenimiento	Frecuencia
		entrada para iniciar la operación de la unidad	
		Repetir el mismo proceso en el otro canal del desarenador.	
Caja de recepción de arena	Chapoda	Eliminación de maleza	Cada 15 días
	Limpieza	Traslado de arena y lodo seco fuera del lecho	Semanal
Rejilla manual		Eliminar cualquier residuo solido de gran tamaño, como piezas de madera, bolsas, botellas, trapos etc.	Diario
		Limpiar y lavar cuantas veces sea necesario.	Diario
Obra de demasías y drenaje pluvial	Limpieza	Mantenerlo limpia de maleza, vegetación y basura.	Mensual en verano, invierno después de cada episodio lluvioso
Canaleta Parshall	Limpieza	Deben eliminarse depósitos y costras que puedan formarse.	Cada quince días
	Lectura	Deben anotarse al menos 12 lecturas(se deben registrar lecturas por 24 horas)	Diario / Quincenal
Canal de conducción, interconexión cajas de paso y distribución de flujo	Limpieza	Desprender y remover la arena, lodos y todo el material adherido en el fondo y en las paredes, utilizando escoba palas y rastrillos.	Cada quince días
Laguna anaerobia	Limpieza	Extraer material flotante a las orillas del espejo de agua de las lagunas	Diario
	Taludes	Inspeccionar la condición de los taludes y reparar de inmediato los daños encontrados	Semanal
	Extracción de lodos	Verificar el nivel de acumulación de lodos	Semestral
		Cuando el nivel de acumulación de lodos supere un estrato mayor a los 0.5 m de altura, esta se deberá limpiar por vía húmeda	Anual

Ubicación	Punto	Mantenimiento	Frecuencia
Sistema de lagunas	Limpieza de espejo de agua	Remover natas, grasas y sólidos flotantes con un desnatador	Diario / Mensual
	Taludes	Inspeccionar la condición de los taludes y reparar de inmediato los daños encontrados	Semanal
	Extracción de lodos	En la laguna primaria, cuando el nivel de acumulación de lodos supere estrato mayor a los 0.5 m de altura, esta se deberá limpiar	Cada dos años
Pila de secado de lodos	Chapoda	En la laguna secundaria, cuando el nivel de acumulación de lodos supere un estrato mayor a los 0.5 m de altura, esta se deberá limpiar	Cada cinco años
	Vectores	Mantener libre de animales y roedores, sobre todo de las tortugas que obstruyen el drenaje normal	Cada 10 años
Laboratorio	Chapoda	Mantener limpio de vegetación y maleza en los alrededores de las lagunas, al igual que los caminos interiores	Tres veces por semana y cuando ocurra

Fuente: GIZ (2012)



Lider en Ciencia y Tecnología

CAPÍTULO III

Marco teórico

***“El agua sucia no se puede lavar”
-Proverbio africano.***

CAPITULO III. MARCO TEÓRICO

3.1. Aguas residuales

3.1.1. Generalidades

La descarga de aguas residuales crudas es un peligro a la salud pública especialmente cuando se utilizan los cuerpos receptores contaminados como fuente de agua potable, para aseo personal, lavado de ropa, riego y pesquería (Oakley, S. M., 1998).

Las aguas servidas son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, 2014).

Según el Decreto 21-2017, Las aguas residuales domesticas son generadas por las actividades de tipo domestica del hombre, (inodoros, ducha, lavatorios, fregaderos, lavado de ropa, entre otros).

3.1.2. Características de las aguas residuales

a) Características físicas

Temperatura: Es un parámetro importante en el proceso de tratamiento del agua residual. Favorece el proceso de fotosíntesis y el metabolismo de las bacterias que limpian el agua. Temperaturas entre 20 y 25 °C generan condiciones óptimas para la producción de oxígeno en las lagunas facultativas. El rango de temperaturas mínimas y máximas donde disminuye la eficiencia en la remoción de contaminantes es entre 4 y 35 °C., mientras que la fermentación anaerobia se lleva a cabo después de los 22 °C y disminuye debajo de los 15 (Cortés, Treviño, & Tomasini, 2017).

b) Características químicas

pH: La actividad biológica se desarrolla dentro de un intervalo de pH generalmente estricto. Un pH que se encuentre entre los valores de 5 a 9, no suele tener un efecto significativo sobre la mayoría de las especies, aunque algunas son muy estrictas a

este respecto. Un aspecto importante del pH es la agresividad de las aguas ácidas, que da lugar a la solubilización de sustancias por ataque a los materiales (Espigares & Perez, 1985).

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅): Se define como el oxígeno disuelto necesario para que los organismos vivos que se encuentran en el agua descompongan la materia orgánica (Cortés, Treviño, & Tomasini, 2017).

c) Características biológicas

Algas: Existen en formas unicelulares, pluricelulares, móviles o inmóviles; no fijan nitrógeno atmosférico, pero lo requieren para sus procesos metabólicos, especialmente en forma inorgánica.

La presencia de las algas en niveles adecuados asegura el funcionamiento de la fase aerobia de las lagunas. Cuando se pierde el equilibrio ecológico, se corre con el riesgo de producir el predominio de la fase anaerobia, que trae como consecuencia una reducción de la eficiencia del sistema (Cortés, Treviño, & Tomasini, 2017).

Virus: Proceden de la excreción, por parte de individuos infectados, ya sean humanos o animales. Poseen la capacidad de adsorberse a sólidos fecales y otras materias particuladas, favoreciendo de esta forma su supervivencia durante tiempos prolongados en las aguas residuales. Se pueden encontrar virus pertenecientes a distintos grupos: Poliovirus, virus Echo, Coxsackievirus A y E, virus de la hepatitis, agente de Norwalk, Rotavirus, Reovirus, Adenovirus y Parvovirus (Espigares & Perez, 1985).

Bacterias: Organismo unicelular y procariota perteneciente al reino monera, Su aspecto externo es variado, puede poseer una forma esférica (coco), helicoidal o alargado (bacilo). Y aunque se pueden encontrar aisladas, cuando las condiciones son favorables se multiplican asexualmente por bipartición y generan colonias. La estructura celular consta de una membrana lipídica en cuyo citoplasma abundan los ribosomas. Las bacterias carecen de membrana nuclear, por lo que el material genético se halla esparcido por toda la

célula; este consta de un único cromosoma circular y, a veces, existe un segundo anillo muy reducido denominado “plásmido” (Cortés, Treviño, & Tomasini, 2017).

3.1.3. Niveles de tratamiento de aguas residuales domesticas

A pesar que son muchos los métodos usados para el tratamiento de aguas residuales, todos pueden incluirse dentro de los cinco procesos siguientes (Martinez, 2002):

a) Tratamiento preliminar

Las unidades que componen el tratamiento preliminar están destinadas a eliminar o separar los sólidos mayores o flotantes, a eliminar los sólidos orgánicos pesados y eliminar cantidades excesivas de aceites o grasas. Sirven también para minimizar algunos efectos negativos al tratamiento como grandes variaciones de caudal u obstrucciones a los equipos mecánicos y tuberías. Las unidades comúnmente usadas son:

- **Canal de rejillas:** En general, las rejillas son dispositivos formados por barras metálicas paralelas del mismo espesor e igual espaciamiento. Sirven para: a) Proteger las bombas, registros, tuberías, piezas especiales, etc., de taponamientos y abrasión. b) Evitar la acumulación de basura en las lagunas.
- **Desarenador:** Los desarenadores son tanques que evitan la decantación de arena en las lagunas primarias cerca de la entrada. Protegen al equipo mecánico de la abrasión y el desgaste; reduce la obstrucción de los conductos causada por la deposición de partículas en las tuberías o canales, generalmente en los cambios de dirección y reducen la acumulación de material inerte en los estanques, lo que da lugar a pérdidas en el volumen.
- **Medidor de caudal:** En cualquier sistema de tratamiento es muy importante conocer el flujo que entra. En las lagunas, los dispositivos más empleados son los vertedores y los canales Parshall que no requieren equipo electromecánico, son de fácil mantenimiento y operación (Comisión Nacional del Agua, 2007).

b) Tratamiento primario

El propósito fundamental de estas unidades para este proceso consiste en disminuir suficientemente la velocidad de las aguas residuales para que puedan sedimentarse los sólidos (Martinez, 2002). Entre las unidades existentes en este tipo de tratamiento se encuentra el tanque Imhoff y la fosa séptica.

Sin embargo, también existen los sedimentadores primarios que a diferencia de la fosa séptica y los tanques Imhoff, en estas unidades no se trata los lodos por lo que los lodos necesitan tratamiento adicional. Estas unidades pueden ser redondo o rectangulares, y tienen como función la reducción de los sólidos suspendidos, grasas y aceites de las aguas residuales. Las eficiencias esperadas son del 55% de los sólidos.

c) Tratamiento secundario

Este tratamiento debe hacerse cuando las aguas residuales todavía contienen, después del tratamiento primario, más sólidos orgánicos en suspensión o solución que los que puedan ser asimilados por las aguas receptoras sin oponerse a su uso normal adecuado (Martinez, 2002).

La finalidad de éste es remover material orgánico en suspensión. Se utilizan procesos biológicos, aprovechando la acción de microorganismos, que en su proceso de alimentación degradan la materia orgánica. La presencia o ausencia de oxígeno disuelto en el agua residual, define dos grandes grupos o procesos de actividad biológica: Los aeróbicos (en presencia de oxígeno) y los anaeróbicos (en ausencia de oxígeno). En esta etapa se utilizan comúnmente las lagunas de estabilización y el sistema de lodos activados (Ramalho, 1990).

3.2. Lagunas de estabilización

3.2.1. Generalidades

En general, las lagunas son depósitos contruidos mediante la excavación y compactación de la tierra que almacenan agua de cualquier calidad por un período determinado. Las lagunas constituyen un tratamiento alterno interesante ya que

permiten un manejo sencillo del agua residual, la recirculación de nutrientes y la producción primaria de alimento en la cadena alimenticia. Su popularidad se debe a su simplicidad de operación, bajo costo y eficiencia energética (CNA, 2007).

En estas se realiza un tratamiento por medio de la actividad bacteriana con acciones simbióticas de algas y otros organismos (Cortés, Treviño, & Tomasini, 2017).

En esta simple descripción se establecen los aspectos fundamentales del proceso de tratamiento del agua que se lleva a cabo en las lagunas de estabilización:

- Es un proceso natural de autodepuración.
- La estabilización de materia orgánica se realiza mediante la acción simbiótica de bacterias, algas, y otros organismos superiores.
- Se presentan, procesos físicos de remoción de materia suspendida.
- Se efectúan cambios químicos en la calidad del agua que, entre otros aspectos, mantienen las condiciones adecuadas para que los organismos puedan realizar la estabilización, transformación, y remoción de contaminantes orgánicos biodegradables y, en algunos casos, nutrientes.
- Se establecen cadenas tróficas y redes de competencia que permiten la eliminación de gran cantidad de microorganismos patógenos que se encuentran presentes en las aguas, residuales.

Por lo tanto, las lagunas de estabilización se consideran y pueden proyectarse como un método de tratamiento de la materia orgánica y de remoción de los patógenos presentes en el agua residual (CNA, 2007).

3.2.2. Procesos que se desarrollan en las lagunas de estabilización

En las lagunas de estabilización residen varios tipos de bacterias, hay aerobias, facultativas y anaerobias. Las bacterias descomponen la materia orgánica a elementos más sencillos, que serán asimilados por las algas.

a) Bacterias purpuras sulfúreas

Muchas especies de la Familia Chromatiaceae (bacterias púrpuras del azufre) son púrpuras, aunque otras son naranja oscuro o con varios tonos de morado o rojas. Estas bacterias crecen en cualquier ambiente acuático donde la luz tenga la longitud de onda adecuada para penetrar la masa de agua, que exista un suministro adecuado de CO₂ y nitrógeno, y formas reducidas de azufre o hidrógeno (Cortés, Treviño, & Tomasini, 2017).

b) Algas

Las algas constituyen un grupo de organismos acuáticos que pueden ser unicelulares o multicelulares, móviles o inmóviles y, según la familia filogenética, tienen diferentes combinaciones de pigmentos fotosintéticos. Como autótrofos, las algas solo necesitan nutrientes inorgánicos, como N, fósforo (P) y un conjunto de micro elementos, para reparar el CO₂ y crecer en presencia de la luz solar. Las algas no fijan el N atmosférico; requieren una fuente externa de N inorgánico en forma de nitrato (NO₃) o NH₃. Algunas especies de algas son capaces de usar aminoácidos y otros compuestos orgánicos de N. El oxígeno es un subproducto de estas reacciones (Agencia de Protección Ambiental, 2011).

3.2.3. Coloración

Una laguna facultativa y de maduración normalmente tiene una coloración verde brilla en la salida. La entrada de una laguna facultativa puede tener una coloración gris/café hasta el intermedio, donde debe ser verde brilla (Oakley, 2005). El color del agua y la apariencia general de una laguna indica el estado general de los microorganismos en las capas superficiales de cada unidad. Esta determinación es estimada por el operador. A continuación, se dan a conocer los casos que se pueden presentar en una laguna.

- **Color verde intenso:** Normal en lagunas facultativas y de maduración, indica que la laguna está en buenas condiciones.
- **Café:** Se da por la reducción en la fotocinesis.

- **Color gris oscuro:** El gris oscuro en lagunas anaeróbicas representa un color normal, pero en lagunas facultativas este color es indicativo de que la laguna ha sido sobrecargada con materia orgánica.
- **Verde lechoso:** Con ciertas aguas residuales tibias puede ocurrir la precipitación de hidróxido de magnesio y fosfato de calcio con el consecuente aumento del pH en la laguna. Esto puede causar un mal funcionamiento de la misma.
- **Color azul verdoso:** Una nata azul verdosa con aspecto de pintura en la superficie de la laguna es una indicación del establecimiento de una especie de algas azul-verdosas. El crecimiento de este tipo de algas es indeseable y tiene un efecto negativo sobre la penetración de la luz solar.
- **Verde amarillento:** En una laguna facultativa el color verde intenso puede cambiar a verde amarillento cuando hay una sobrecarga en el afluente. Sobre la superficie verde pueden aparecer manchas alrededor de la entrada de la laguna.
- **Rosa o rojo:** Presencia de bacteria fotosintéticas del azufre por condiciones anaeróbicas.

3.3. Nutrientes

Se llaman así las especies químicas utilizadas como alimento en el desarrollo de los microorganismos (Cortés, Treviño, & Tomasini, 2017). Aunque los nutrientes abarcan un gran número de especies que los microorganismos necesitan en poca cantidad, el nombre se utiliza casi siempre para indicar a las distintas formas de nitrógeno y fósforo, que son los que se necesitan en mayores cantidades.

- **Fósforo:** Es esencial para el crecimiento de los organismos. Las formas en que se puede encontrar en las aguas residuales, son ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El fosfato satisface los requerimientos de fósforo de todos los organismos y se necesita en niveles mucho más bajos que el nitrógeno. Al igual

que éste, es responsable de la producción de procesos de eutrofización (Espigares & Perez, 1985).

3.4. Organismos patógenos

Organismos, incluidos virus, bacterias o quistes, capaces de causar enfermedades tales como: Tifus, cólera o disentería en un receptor; por ejemplo: El hombre (Cortés, Treviño, & Tomasini, 2017).

- **Coliformes fecales:** Son bacterias de origen entérico exclusivamente; se determinan a $T^0 = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante 48 h, sus Indicadores principales: Enterococcus y Escherichia coli estas se encuentra en elevadas concentraciones en el intestino del ser humano y otros animales de sangre caliente, no se desarrolla en el medio natural es un indicador biológico más ampliamente utilizado. (Sanchez, 2015)

3.5. Carga orgánica

Es medida como DBO_5 , o DQO que se le aplica diariamente a la laguna que será estabilizada en el tratamiento biológico. Su valor se expresa normalmente en kg de DBO_5 , por unidad de tiempo.

Además, se define como el contenido de compuestos de carbono en un efluente, cualquiera sea su origen. Dichos compuestos de carbono son estructuras químicas (moléculas) donde el carbono está enlazado a hidrógeno y otros elementos como azufre, oxígeno, nitrógeno, fósforo y cloro, entre otros (Metcalf, 1995).

3.6. Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Es uno de los varios gases que pueden absorber y emitir radiación de onda larga infrarroja en la atmósfera planetaria. Este fenómeno se denomina a menudo como efecto invernadero (IPCC, 2001).

Los gases que se encuentran más frecuentemente en la composición de las aguas residuales son nitrógeno, oxígeno, anhídrido carbónico, sulfhídrico, amoníaco y

metano. Los tres primeros se encuentran en todas las aguas expuestas al aire, ya que son gases comunes en la atmósfera. El resto son resultado de la descomposición de la materia orgánica (Espigares & Perez, 1985).

3.6.1. Metano (CH_4)

Es el principal subproducto de la degradación anaerobia de la materia orgánica de las aguas residuales. Es un hidrocarburo incoloro, inodoro y de gran valor como combustible. Aunque no suele encontrarse en grandes niveles, debido a que cantidades muy pequeñas de oxígeno impiden su formación, es necesario tener precaución ante el gran peligro de explosión que supone su alta combustibilidad. En aquellos lugares de las conducciones y alcantarillas donde pueda producirse, es necesaria una ventilación adecuada (Espigares & Perez, 1985).

El CH_4 se produce por la acción de los microorganismos metanogénicos cuando se presentan ambientes con baja disponibilidad de oxígeno, como es el caso de los sedimentos o aguas contaminadas (Liikanen, 2002b) (Brock, 2004). El CH_4 es producto de la reducción del CO_2 , en la cual el H_2 , el acetato y alcoholes son usados como donadores de electrones. El CH_4 es poco soluble en el agua, por ello luego de producirse en los sedimentos se transporta a favor de un gradiente de concentración a zonas con alta disponibilidad de oxígeno en donde puede ser oxidado por los microorganismos metanotrofos (Huttunen, 2001a).

3.6.2. Directrices ambientales del IPCC, 2006

Es una guía que implementa la orientación metodológica para la estimación de metano, procedente de los tratamientos y eliminación de aguas residuales.

De modo que, muestra que las emisiones dependen de la cantidad de desechos orgánicos generados y de un factor de emisión que caracteriza la proporción en la que estos desechos generan CH_4 (IPCC, 2006).

A continuación, se resumen tres niveles metodológicos para estimar el CH_4 a partir de esta categoría.

- El método de **Nivel 1** aplica valores por defecto para el factor de emisión y para los parámetros de la actividad. Este método se considera de buena práctica para los países con escasa disponibilidad de datos.
- El método de **Nivel 2** sigue la misma metodología que el Nivel 1, pero permite la incorporación de un factor de emisión específico del país y de datos de la actividad específicos del país. Por ejemplo, un factor de emisión específico para un importante sistema de tratamiento, basado en mediciones en el terreno se podría incorporar con este método. Hay que tomar en cuenta la cantidad de lodos eliminados por incineración, en vertederos y en suelos agrícolas.
- Para un país con buenos datos y metodologías avanzadas, se puede aplicar una metodología específica del país, como un método de **Nivel 3**. Un método aún más avanzado, específico del país, puede basarse en datos específicos de cada planta en las grandes instalaciones de tratamiento de aguas residuales.

CAPÍTULO IV

Diseño metodológico

***“Miles de personas han sobrevivido sin amor;
ninguna sin agua”***

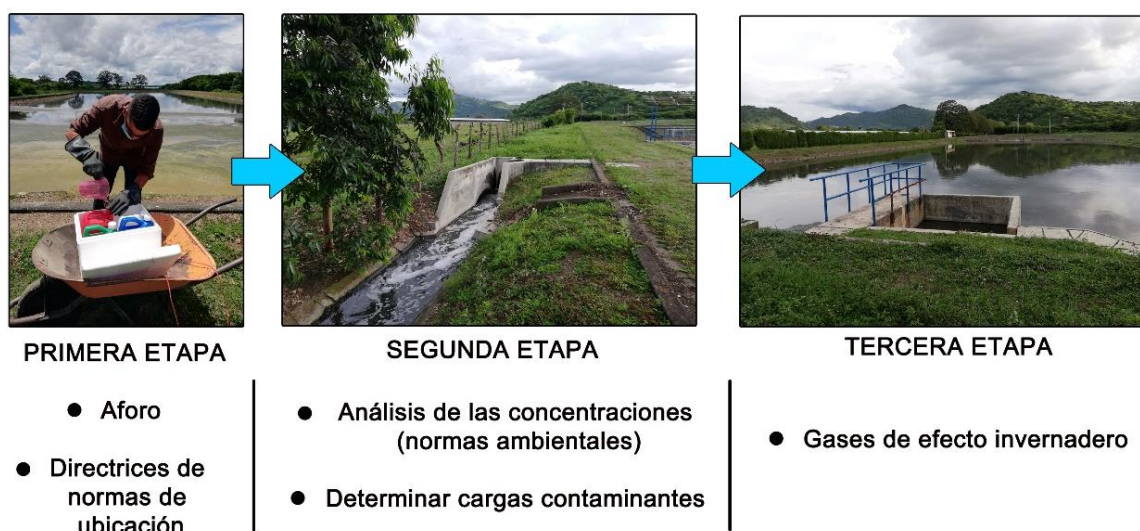
-W.H. Auden.

CAPITULO IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo de investigación

De acuerdo con el objetivo planteado la investigación es aplicada, dado que se da una explicación de cómo funcionan los STAR y su relación con las cargas contaminantes que se producen de la estabilización de la materia orgánica. Se estructuró una metodología secuencial en tres etapas, para la obtención y recopilación de la información que son una base para el cumplimiento del objetivo, como se observa en la figura 1.

Figura 1.- Etapas



Fuente: Elaboración propia

4.2. Etapa 1

4.2.1. Cálculo de caudales

Para el cálculo del caudal, se realizó aforos en el afluente y efluente del sistema, durante un período de siete días.

a) Afluente

Para determinar el caudal por hora en el afluente, fue a través de una canaleta Parshall graduada con 72 cm. Para la determinación del caudal se empleó la ecuación propuesta por Marais y Van Haandel (1996). El monitoreo en este afluente

se realizó cada hora registrándose el tirante de agua ver ecuación 1. El formato de registro de tirantes.

Ecuación 1.- Determinación de caudal para canaleta Parshall

$$Q = 2.2 * W * H^{3/2}$$

Donde:

Q : Caudal (m^3/s)

W: Ancho de la garganta (m)

H: Carga o altura de la lámina de agua (m)

b) Efluente

Para el caudal del efluente del sistema de tratamiento se calculó con otra ecuación debido a que no cuenta con canaleta Parshall, ver ecuación 2.

Ecuación 2.- Ecuación de la continuidad

$$Q = V * A (m^3/seg)$$

Donde:

Q : Caudal en m^3/s

V: Velocidad del flujo de agua (m/s)

A: Área (se obtiene de multiplicar el ancho del canal y el tirante de agua registrado cada hora)

Nota: Para medir la velocidad se utilizó un objeto flotante que, al ser colocado en el espejo de agua, este recorrió cierta distancia, y midiendo su tiempo de desplazamiento de un lugar a otro, se determinó la velocidad.

c) Balance hídrico

De acuerdo con Sáenz (1985) estableció el criterio de la consideración de realizar un balance hídrico para el diseño de las lagunas de estabilización. Establecía que se debía tomar en cuenta el mes más crítico; es decir, el de menor precipitación, nivel freático muy bajo y alta evaporación. Una vez analizada la ecuación 3, el valor

del caudal en el efluente tiene que resultar positivo. Posiblemente sea prudente reducir el área total del sistema de tratamiento, es en esta parte donde se diseña con diferentes arreglos para lograr la menor área posible y asegurar el funcionamiento hídrico del sistema lagunar.

Ecuación 3.- Determinación de balance hídrico

$$Q_e = Q_a + (P_r + P_c) - (E + P_e)$$

Donde:

Q_e = Caudal del efluente.

Q_a = Caudal afluente de aguas residuales.

P_r = Precipitación sobre el área de laguna.

P_c = Infiltración de agua subterránea hacia la laguna.

E = Evaporación

P_e = Pérdida por percolación: sucede cuando no se impermeabilizan las lagunas.

En el caso de las evaluaciones a los sistemas de tratamiento lagunares de acuerdo con Cortés et al. (2011), IMTA (2019), Larios y Pravia (2018), Alvarado y Villanueva (2017), los valores que se obtienen en el cálculo de los caudales, se deben aplicar algunas consideraciones al balance hídrico para corregir el caudal del efluente de cada unidad de tratamiento, debido a las condiciones actuales que existen en el STAR, se tomaran las siguientes:

- Los valores de precipitación se despreciaron, ya que el sistema cuenta con un vertedero de demasías, el cual elimina los excedentes de aguas pluviales en las lagunas, evitando así caudal en exceso.
- Para los valores de evaporación se utilizaron los valores históricos, de la estación meteorológica de Jinotega, los cuales se solicitaron a INETER.
- Los valores de infiltración no fueron considerados, debido a que, con las mejoras que se realizó en el módulo B del sistema, se recubrieron las lagunas con un geotextil, lo cual evita la infiltración de aguas subterráneas a las unidades del STAR.

Es por ello, que de acuerdo a los criterios antes mencionados la ecuación se simplifica (ver ecuación 4). Esta coincide con la ecuación propuesta por Cortés Martínez, et al.,2011.

Ecuación 4.- Corrección al balance hídrico

$$Q_e = Q_i - 0.001Ae$$

Donde:

Q_e: Caudal en el efluente de la laguna (m³/día)

Q_i: Caudal medio del afluente (m³/día)

A: Área de la laguna (m²)

e: Factor de evaporación (mm/día)

4.2.2. Período de retención

El período de retención para cada laguna se obtuvo a través de la relación del volumen de la laguna entre el caudal del afluente promedio. Se detalla la ecuación número 5 el cálculo de período de retención planteado por Arthur (1984).

Ecuación 5.- Determinación del período de retención

$$TRH = \frac{V_{lag}}{Q_{medio}}$$

Donde:

V_{lag}: Volumen de laguna (m³)

Q_{medio}: Caudal medio del STAR (m³/día)

4.2.3. Recolección y preparación de muestra

Se realizó la toma de muestras a lo largo del sistema, las cuales fueron de tipo compuesta, constituida por la mezcla homogénea de muestras puntuales con intervalos de una hora, sin exceder las 24 horas de muestreo, ver ecuación 6. La cantidad de muestra recolectada por hora se determinó mediante la siguiente operación matemática:

Ecuación 6.- Recolección para muestras compuestas

$$V_i = \frac{(Q_i * V)}{(Q_p * n)}$$

Donde:

V_i: Volumen de alícuota de muestra simple (L)

Q_i: Caudal a la hora de la muestra simple (L/s)

V: Volumen total del recipiente (L)

Q_p: Caudal promedio (L/s)

n: Número de muestras integrales tomadas a las diferentes horas

Ilustración 4.- Recolección de muestras



Fuente: Elaboración propia

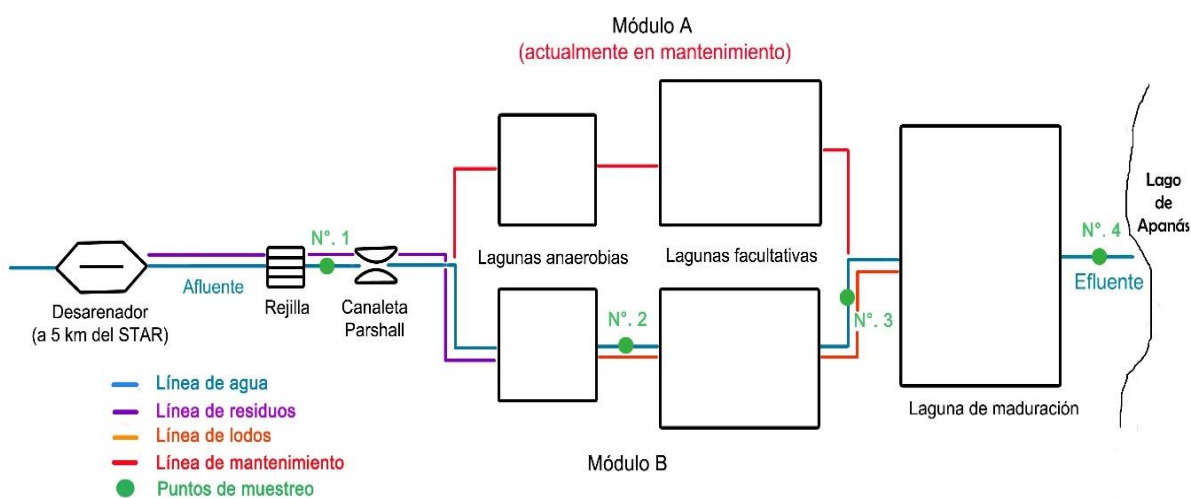
Para esto, se consideraron puntos de muestreo representativos dentro del STAR, que ayuden a obtener una concordancia entre resultados de laboratorio y las condiciones actuales que existen en el sistema.

Es por ello, que se consideró como primer punto de muestreo el afluente general del STAR posterior a la rejilla, ya que este es de gran importancia, para conocer la concentración de cargas contaminantes que ingresan al sistema, ya que, aún las aguas no han recibido ningún tipo de tratamiento y se consideran aguas crudas. Posteriormente, el STAR se divide en dos módulos que trabajan en paralelo, compuesto por dos lagunas (anaerobia + facultativa) dispuestas en serie, debido al mantenimiento que se realiza en la actualidad en el módulo A, se tomó en cuenta como segundo y tercer punto de muestreo, el efluente de ambas lagunas que

conforman el módulo B, ya que estas tienen como función el tratamiento primario y secundario respectivamente.

Luego se tiene como tratamiento terciario una laguna de maduración, en la cual se tomó su efluente como cuarto y último punto de muestreo, con el fin de conocer la concentración de cargas contaminantes que son vertidas al cuerpo receptor (lago de Apanás), ya que este también funciona como efluente general del STAR; tal y como se representa en el siguiente esquema.

Esquema 6.- Puntos de la toma de muestras en el STAR



Fuente: Elaboración propia

4.3. Etapa 2

4.3.1. *Parámetros físico-químicos a evaluar*

Se presentan en la tabla 5, los parámetros que fueron evaluados para determinar cargas contaminantes, así como, los métodos empleados para las determinaciones experimentales.

Los análisis se realizaron en el Programa de Investigación Estudios Nacionales y Servicios Ambientales (PIENSA), los parámetros químicos obtenidos de las pruebas de laboratorio sirvieron para verificar el cumplimiento con respecto a los valores máximos permisibles de vertido, estipulados en el Decreto 21-17 ver tabla 6; y de

establecimiento de las disposiciones que regulan las descargas de aguas residuales domésticas provenientes de los sistemas de tratamiento en el lago Xolotlán establecidos en el Decreto 77-2003 ver tabla 7, y los parámetros establecidos en la norma técnica obligatoria nicaragüense para regular los sistemas de tratamientos de aguas residuales y su reúso (NTON 05 027-05) ver tabla 8.

Tabla 5.- Parámetros físico-químicos y bacteriológicos

Parámetro	Lugar de medición	Método SM/EPA
DBO ₅	Laboratorio	SM/EPA 5510-B
Fósforo total	Laboratorio	SM/EPA 4500-C
Coliformes fecales	Laboratorio	SM/EPA 9221E
Coliformes totales	Laboratorio	SM/EPA 9221D

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.- Valores máximos permisibles por el Decreto 21 – 2017

Parámetros	Límites máximos permisibles Decreto 21 – 2017, Art. 24 y 26
DBO ₅ (mg/L)	110
Fósforo (mg/L)	10
Coliformes fecales (NMP/100mL)	1.00E+05 (2017-2022)

Fuente: Decreto 21-2017

Tabla 7.- Los permisos de descarga no podrán ser mayores a los siguientes parámetros, límites y frecuencias (Decreto 77-2003)

Parámetro	Límites máximos permisibles (promedio diario)	Frecuencia, muestreo y tipo de muestras
DBO ₅ (mg/L)	90	Cada dos meses en época seca
Coliformes fecales	500 000 por cada 100 MI	El tipo de muestra: Muestra compuesta (MC)

Fuente: Decreto 77-2003

Tabla 8.- Límites máximos permisibles para aguas residuales de reúso (NTON 05 027-05)

Parámetros	Unidad	Urbana	Recarga de acuíferos	Recreación sin contacto	Acuicultura
DBO ₅ (mg/l)	mg/l	30	0	2	15

Fuente: NTON 05 027-05

a) Coliformes fecales

Se compararon los datos obtenidos de los resultados de laboratorio de las muestras de Coliformes fecales y totales con respecto al Arto.24. “Límites permisibles de Coliformes fecales” el cual se rige por el principio de gradualidad, y con el Decreto 77-2003 Arto.7 Parámetros.

b) Nutrientes

Los resultados de los análisis de fósforo total se compararon con el valor permisible estipulado en el Decreto 21-17 en su Arto.26. De los vertidos de los Sistemas de Tratamiento de Agua Residuales de tipo doméstico, que sean descargados a los cuerpos receptores.

Se consideró únicamente el fósforo en base a carga de nutrientes, debido a que es un componente importante para los microorganismos, al tener escasez de este, afecta el proceso de depuración del STAR y por ende su funcionamiento operacional. También, es un contribuyente en el proceso de eutrofización del cuerpo receptor, cuando se encuentra en altas concentraciones, siendo de gran importancia tener un control de las cantidades vertidas.

4.3.2. Determinación de cargas contaminantes

Se realizó el cálculo a fin de conocer la carga contaminante que realmente se está disponiendo por parte del sistema. En este sentido las evaluaciones se hicieron en función de las concentraciones de DBO₅, fósforo total, por lo que la ecuación general será:

Ecuación 7.- Determinación de carga de contaminante (CC)

$$\text{CC} = \text{Concentración de contaminante} \times \text{Caudal} \times 0.0864$$

Donde:

Concentración: Se tomó cada una de las concentraciones determinadas por análisis químicos y fueron sustituidas en esta ecuación para obtener valores de carga orgánica en función de DBO₅, carga de nutrientes en función de fósforo, expresada en mg/L.

Caudal: caudal promedio expresado en L/s

0.864 = conversión de mg/l a Kg/ día para el cálculo de la COT

a. Determinación de carga orgánica per cápita

La determinación de carga orgánica per cápita, determinó la cantidad de carga orgánica presente en el afluente por persona y se determinó mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 8.- Carga orgánica per cápita

$$\text{COP} = \frac{\text{CO}}{\text{P}}$$

Donde:

CO: Carga orgánica (kg DBO₅/día)

P: Población (hab)

COP: Carga orgánica per cápita (gr DBO₅/ hab/ día)

b. Determinación de la carga orgánica superficial

Se utilizó este método, ya que es el que más se adecúa al diseño de las lagunas de Nicaragua, ya que las normativas manejan el diseño con respecto a Yánez.

El CEPIS, a través de los estudios conducidos por Yánez (1984), propone que esa Carga Superficial Máxima (CSM) se puede estimar a partir de:

Ecuación 9.- Carga superficial máxima

$$C_{sm} = 357.4 * 1.085^{T-20}$$

Donde:

T: La temperatura en °C, en el mes más frío

c. Carga orgánica superficial aplicada real

Se obtuvo mediante los valores de concentración obtenidos a través de los parámetros de DBO₅, caudal promedio y el área real de la laguna. De tal forma, se expresa en la ecuación N.º 10:

Ecuación 10.- Carga orgánica superficial aplicada

$$Csa = \frac{\text{Concentracion x Caudal}}{\text{Area de la laguna}}$$

La determinación de estas cargas sirve para conocer cuánto es la cantidad de carga superficial máxima que debería tener cada una de las lagunas, para que no se alteren sus procesos biológicos, y saber si actualmente los valores de carga orgánica aplicada han superado esto. De tal manera que se puede esclarecer si las lagunas han tenido alguna alteración de estos procesos debido a si existe una sobre carga orgánica.

d. Determinación de habitante equivalente

Se realizó el cálculo de habitantes equivalentes para saber cuánto es la diferencia en relación a los habitantes reales para los municipios de Jinotega, Sébaco, Somoto y Matagalpa con base a una carga orgánica de 60 g/he*d.

Ecuación 11.- Habitante equivalente

$$he = \frac{\text{Caudal (m}^3\text{/día)}}{\text{Carga orgánica biodegradable (g /he*d)}}$$

Donde:

Carga orgánica biodegradable = 60 g/he*d

4.3.3. Determinación de las eficiencias en el STAR

Para la eficiencia en la remoción de cargas contaminantes en el STAR de Jinotega, se utilizó:

Ecuación 12.- Determinación de las eficiencias del STAR de Jinotega

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{\text{Afluente} - \text{Efluente}}{\text{Afluente}} * 100$$

A través de la ecuación N.º 12, se obtuvo la eficiencia en el efluente del STAR, con respecto a los valores de DBO₅, coliformes fecales, fósforo total, que entran en el sistema.

4.4. Etapa 3

4.4.1. Determinación de los Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Debido a las altas concentraciones de materia orgánica que se degrada en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, es de suma importancia tener un control de gases de efecto invernadero que son emitidos por estos sistemas, ya que estos contribuyen en gran manera al cambio climático y a la alteración del ecosistema.

Se aplicaron dos métodos propuestos en las directrices ambientales del IPCC 2006, los cuales son: el método de examen y el método de recopilación de datos; con el objetivo de realizar una comparativa de ambos métodos, para establecer la diferencia de utilizar valores regionales por defecto y datos específicos del país, y a través de esto, resaltar la importancia de la realización de inventarios nacionales de GEI, que nos garanticen valores que se adecúen a las condiciones reales en los sitios de estudio.

Para calcular y estimar la producción del metano se utilizó datos previamente investigados por el Programa de Investigación Estudios Nacionales y Servicios Ambientales (PIENSA), y en base a juicio de expertos, se utilizaron factores de conversión de metano (MCF) según los datos de estudios hechos en Nicaragua: Lagunas de estabilización (0.22), y los datos de valor de la fracción de la población del grupo de ingreso (U_i) se tomó el 57.3 % equivalente a las personas distribuidas en el área urbana.

Se consideró únicamente el metano (CH₄), ya que este es uno de los gases más comunes y de mayor abundancia en los STAR.

a) Determinación de metano por medio del método de examen

Según lo dicho por el IPCC en 2006, cuando en un país no se dispone de datos para determinar el porcentaje de la población que está conectada a los distintos tipos de tratamiento en uso y, en particular, cuando gran parte de la población carece de sistemas de alcantarillado, la aplicación completa del procedimiento del IPCC puede pasar por alto emisiones de importancia, por lo que se hace necesario cotejar sus resultados con los resultados del método de examen. Este método puede usarse para estimar en forma aproximada las emisiones globales de CH₄ procedentes de las aguas residuales domésticas.

Antes de la aplicación del método de examen se consideró lo descrito en el árbol de decisiones, con el fin de garantizar que fueran cumplidas las pautas para su utilización. Según la línea de decisión (ver figura N° 2), se llegó a la conclusión, que fue necesario el uso de este método para estimar las emisiones de CH₄ provenientes del STAR, debido a que en el país no se cuenta con un método bien documentado para dicha estimación, además de que no se dispone de la caracterización en las fuentes de aguas residuales y no se tiene en cuenta cuál es la fracción de efluentes procedentes de procesos industriales que se conectan a los sistemas de alcantarillado sanitario.

Ecuación 13.- Cálculo del metano por el método del examen

$$WM = P \cdot D \cdot SBF \cdot FE \cdot FTA \cdot 365 \cdot 10^{-6}$$

Fuente: IPCC (2006)

Donde:

WM: Emisión anual de CH₄ procedente del STAR (kg CH₄/año)

P: Población nacional o urbana de algunos países en desarrollo (número de personas)

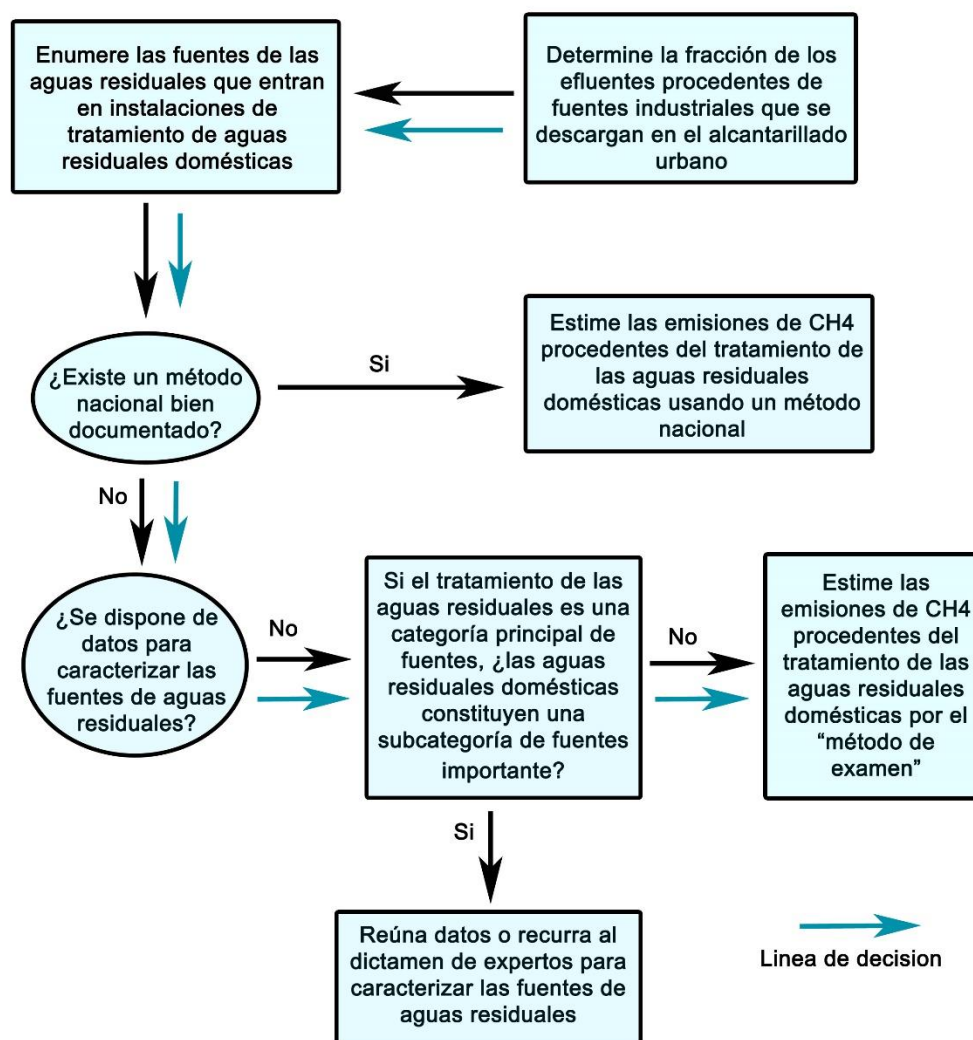
D: Carga orgánica en la demanda bioquímica de oxígeno por persona (gr de DBO_5 /persona/día)

SBF: Fracción de la DBO_5 que se sedimenta rápidamente, valor por defecto = 0,5

FE: Factor de emisión (gr de CH_4 /g de DBO_5), valor por defecto = 0,6

FTA: Fracción de la DBO_5 presente en los lodos que se degrada anaeróbicamente, valor por defecto = 0,8

Figura 2.- Elección según el método del examen del IPCC



Fuente: Adaptado de IPCC (2006)

b) Determinación de la emisión de metano por el método de recopilación de datos

Según las pautas seguidas en el árbol de decisiones (ver figura N°3), se tiene como resultado la aplicación del método de recopilación de datos, y se determinó que Nicaragua se encuentra en nivel dos, en cuanto a la metodología para la estimación de CH₄ provenientes de las aguas residuales domésticas. Esto gracias a que se tomó en cuenta los valores proporcionados por las comunicaciones sobre cambio climáticos en el país, así como los INGEI realizados por el PIENSA, lo que ayuda a la utilización de datos de emisión específicos del país.

Según la línea de decisión, se ha caracterizado las vías de tratamiento de las aguas servidas (recolectadas + tratadas + drenadas hacia la planta), posteriormente se conoce que no existe un método específico en el país para la estimación en las emisiones de CH₄, por lo cual se debe utilizar este método propuesto por el IPCC y datos específicos de emisión que existen en el país (MCF, U_i y B₀), lo cual dio como resultado estimaciones más acorde a las condiciones que se encuentra el sitio de estudio.

- Se determinó las emisiones de GEI por medio de la siguiente ecuación:

Ecuación 14.- Emisiones totales de metano procedentes de las aguas residuales domésticas

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \left[\sum_{i,j} (U_i \cdot T_{i,j} \cdot EF_j) \right] (TOW - S) - R$$

Fuente: (IPCC, 2006)

Donde:

Emisiones de CH₄: Emisiones de CH₄ durante el año del inventario, kg de CH₄/año

TOW: Total de materia orgánica en las aguas residuales del año del inventario, kg de DBO₅/año

S: Componente orgánico separado como lodo durante el año del inventario, kg de DBO₅/año

U_i: Fracción de la población del grupo de ingresos *i* en el año de inventario

$T_{i,j}$: Grado de utilización de vía o sistema de tratamiento y/o eliminación j , para cada fracción de grupo de ingresos i en el año del inventario

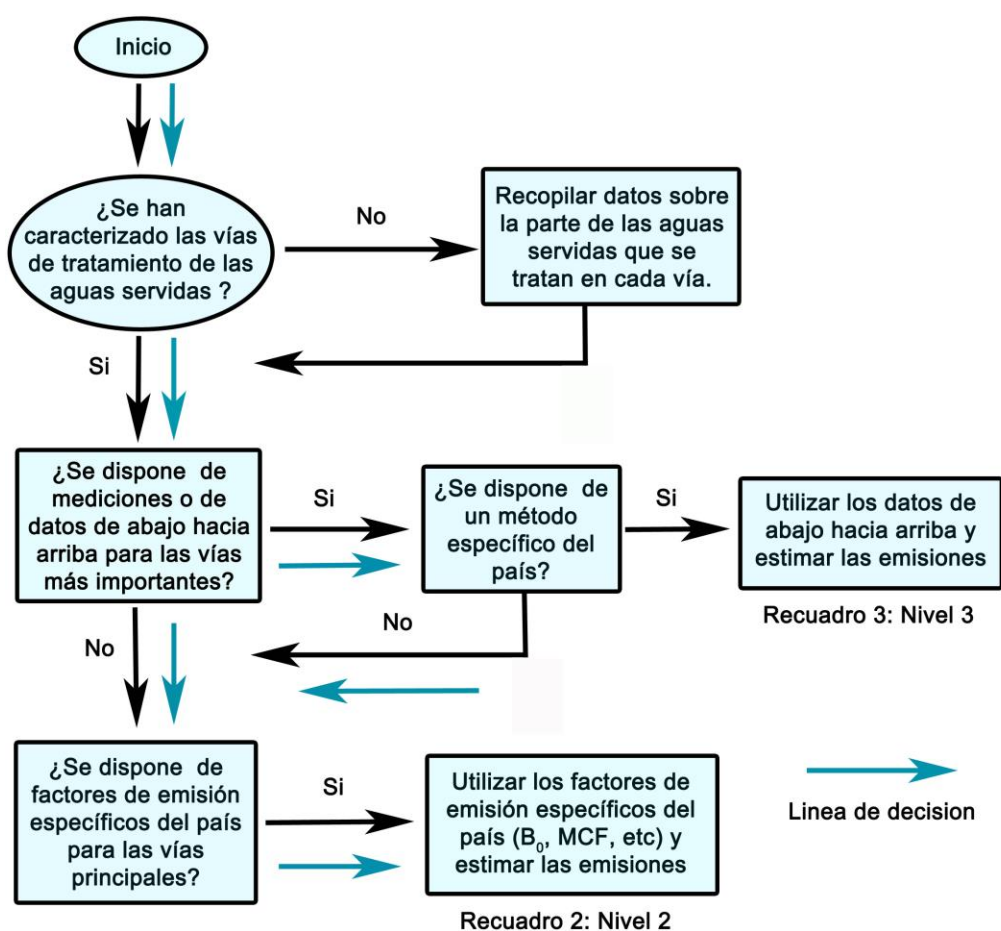
I: Grupo de ingresos: rural, urbano de altos ingresos y urbano de bajos ingresos

j: Cada vía o sistema de tratamiento/eliminación

EF_j : Factor de emisión, kg de CH₄/kg de DBO₅

Nota: Es posible que solo unos pocos países dispongan de datos sobre la separación de lodos y sobre la recuperación de CH₄. El valor por defecto para la separación de lodos es cero. El valor por defecto para la recuperación de CH₄ es cero (IPCC, 2006).

Figura 3.- Árbol de decisión para estimar las emisiones de CH₄ procedentes de las aguas residuales domésticas



Fuente: Adaptado de IPCC (2006)

- **Elección de los factores de emisión**

Para encontrar los factores de emisión de CH₄, se utilizó las siguientes fórmulas:

Ecuación 15.- Factor de emisión de metano para cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación de aguas residuales domésticas

$$EF_j = B_o \cdot MCF_j$$

Fuente: (IPCC, 2006)

Donde:

EF_j: Factor de emisión, kg de CH₄/kg de DBO₅

j: Cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación

B_o: Capacidad máxima de producción de CH₄, kg de CH₄/kg de DBO₅

MCF_j: Factor corrector para el metano (fracción)

Para mantener la coherencia con los datos de la actividad, se expresa en la siguiente tabla los valores por defecto para el potencial máximo de producción de CH₄ para las aguas residuales domésticas.

Tabla 4.- Capacidad máxima de producción de metano

0.6 kg de CH₄/kg de DBO₅
0.25 kg de CH₄/kg de DBO₅
Basado en dictámenes de expertos realizado por autores principales y en Doom et al., (1997)

(incluye los valores por defecto para el potencial de producción de metano).

Fuente: IPCC (2006)

Tabla 5.- Valores MCF por defecto para las aguas residuales domésticas

Tipo de vía o sistema de tratamiento y eliminación	Comentarios	MFC ⁱ	Intervalos
Sistema tratado			
Laguna anaeróbica poco profunda	Profundidad de menos de 2 metros, Recurrir al dictamen de expertos.	0.2	0 – 0.3
Laguna anaeróbica profunda	Profundidad de más de 2 metros	0.8	0.8 – 1.0
Fuente: Basado en dictamen de expertos realizado por los autores principales y en Doom et al., (1997)			

Fuente: IPCC (2006)

- **Elección de los datos de la actividad**

Para esta categoría de fuente son la cantidad total de materia orgánica degradable en las aguas residuales (desperdicio orgánico total). Este parametro es una función de la población humana y del índice de generación de DBO₅ por persona. Se expresa en términos de requisito bioquímico de oxígeno (kg de DBO₅/año).

Ecuación 16.- Total de materia orgánica degradable en las aguas residuales domésticas

$$\text{TOW} = \text{P} \times \text{DBO} \times 0.001 \times \text{I} \times 365$$

Fuente: (IPCC, 2006)

Donde:

TOW: Total de materia orgánica en las aguas residuales del año del inventario, kg de DBO₅/año

P: Población del país en el año del inventario, (personas)

DBO: Per cápita específico del país en el año del inventario, g/persona/día

0,001: Conversión de gramos de DBO₅ a kilogramos de DBO₅

I: Factor de corrección para DBO_5 industrial adicional eliminado en las cloacas (si es recolectado el valor por defecto es 1,25, si no es recolectado el valor por defecto es 1,00)



Líder en Ciencia y Tecnología

CAPÍTULO V

Análisis de resultados

“El nuevo paradigma de este siglo es pasar del agua residual al agua reutilizable”

-Fernando Del Amo.

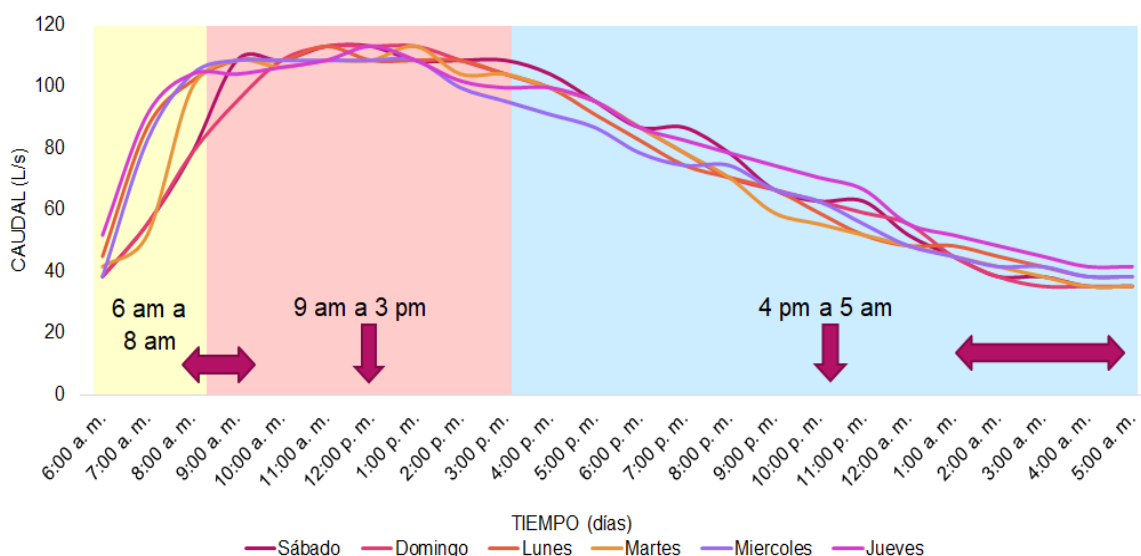
CAPITULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Aporte, distribución y variación de caudales

Se presentan los resultados de aforos de caudales realizado a partir del día sábado 8 de junio hasta el día viernes 14 de junio del 2019 en el afluente y efluente del sistema, ver gráfico N° 1 y gráfico N° 2, los cuales se realizaron durante 24 horas a partir de las 6 de la mañana, obteniendo los datos que ingresan y egresan en este STAR.

En el gráfico N° 1, se puede observar el comportamiento del afluente, en estas lagunas no se presentan los tres picos que se supone deben tener a las 9: 00 am, 1: 00 pm y 5: 00 pm por las actividades que se presentan, dado que en el caso de la ciudad de Jinotega estas lagunas no tiene la suficiente capacidad para el caudal de entrada por lo que están reguladas de tal manera que llevan un tiempo de llenado como se observa a partir de las 8: 00 am hasta la 4: 00 pm que es cuando empieza su tiempo de vaciado a través del bypass.

Gráfico 1.- Mediciones de caudal en el afluente



Fuente: Elaboración propia

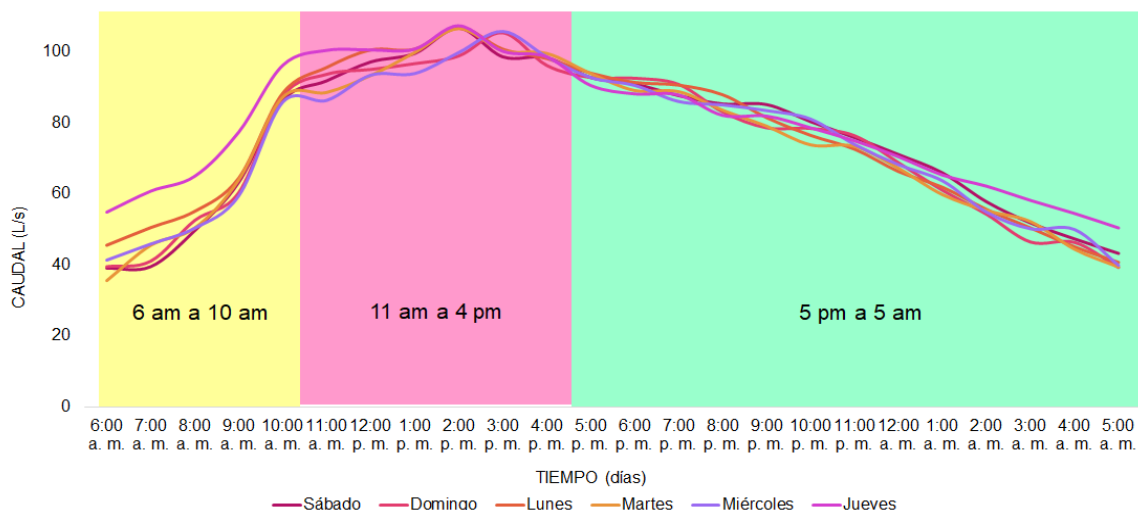
En el gráfico N° 1, en el cuadro de color crema nos muestra el horario que comprende el ascenso de caudal de 6:00 am a 8:00 am, este permanece constante de 9:00 am 3:00 pm como se muestra en el cuadro de color rosado y el cuadro

color celeste muestra el descenso de caudal a partir de las 4:00 pm a 5:00 am, esto se debe al funcionamiento operacional que le dan al sistema como se detalló en el párrafo anterior.

Conforme a lo que indican el gráfico N° 1, de los resultados de aforos, se puede contemplar la variabilidad de caudales que acontecen en el afluente del STAR, mostrando que en el período comprendido entre las 8:00 am y 9:00 am se registran datos de aumento de caudal llegando a un caudal pico que se registra a partir de las 12:00 pm, dado que la hora en que los habitantes de esta ciudad inician sus labores cotidianas (aseo personal, limpieza del hogar, lavado de trastes, ropa, etc.) no es igual a la de entrada del STAR por el tiempo de retardo que sufren estas aguas, es decir el tiempo que tardan en recorrer el sistema de alcantarillado sanitario hasta llegar al STAR, lo cual influye en la hora de mayor demanda teniendo en cuenta que la distancia de la ciudad al sistema es de cinco kilómetros aproximadamente.

El caudal va disminuyendo a partir de las 10:00 pm debido a que las actividades de los habitantes disminuyen en el transcurso del día; llegando a períodos de menor demanda que encierran las horas comprendidas entre las 00:00 am y las 06:00 am, donde las actividades se reducen al máximo.

Gráfico 2.- Mediciones de caudal en el efluente

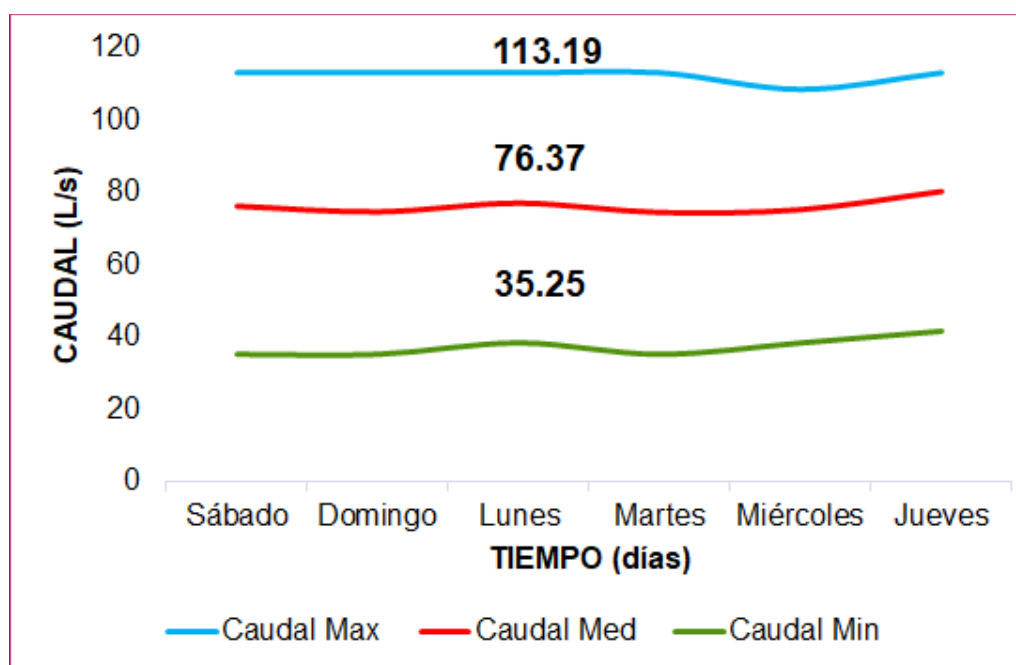


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico N° 2, se puede observar que el comportamiento del efluente tiene la misma tendencia que en el afluente teniendo una reducción en el caudal debido a la evaporación que sufre cada unidad, esta presenta un crecimiento exponencial de estas lagunas es a partir de las 6: 00 am hasta las 10:00 am como lo refleja el cuadro de color amarillo, manteniéndose constante 11: 00 am hasta la 4: 00 pm como refleja el cuadro rosado, teniendo un flujo decreciente entre las 4:00 pm hasta las 5: 00 am como muestra el cuadro verde.

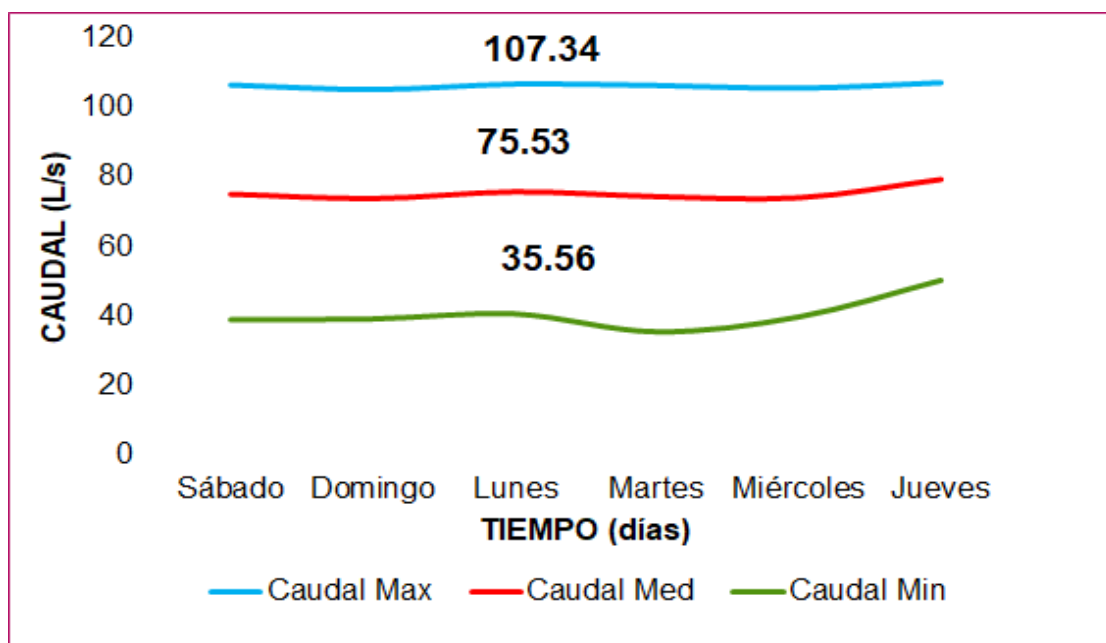
Después de la realización de aforos se procedió a calcular los caudales, seguidamente sus hidrogramas para tener una mejor visión de la forma en la cual se comportan, obteniendo caudales máximos, medios y mínimos a lo largo de los 6 días que estuvieron sujetos a estudios. Tal y como se muestran en los siguientes gráficos N° 3 y N° 4.

Gráfico 3.- Caudales promedios máximos, medios y mínimos en el afluente



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.- Caudales promedios máximos, medios y mínimos en el efluente



Fuente: Elaboración propia

Según los aforos realizados, los caudales en el afluente del STAR oscilan entre 35.25 L/s \pm 113.19 L/s, registrándose un caudal promedio de 76.37 L/s. Siendo este valor mayor al caudal de diseño del STAR que es de 45.3 L/s.

En el efluente del STAR, los caudales máximos obtenidos son de 107.34 L/s, un caudal medio de 75.53 L/s y un caudal mínimo de 35.56 L/s; esto se da debido a la evaporación que ocurre en las lagunas ahí se da una pérdida de flujo, en este caso es del 1% con respecto al caudal medio en el afluente.

Tabla 9.- Datos históricos del caudal en el afluente del STAR de Jinotega

Año de toma de caudales	Caudal promedio en el afluente
Actual 2019	76.37 L/s
ENACAL 2013	73.26 L/s
GIZ 2012	65.12 L/s
Caudal de diseño 2003	45.3 L/s

Fuente: Elaboración propia

En la tabla número 9, podemos observar la alteración del caudal en el afluente del sistema desde su operación y en los 7 años transcurridos, en el año 2003 el sistema fue diseñado para un caudal medio de 45.3 L/s para ambos módulos, pero para el 2005 año en que dio inicio operaciones este presentaba rebose en la entrada del sistema, en el año 2012 el caudal medio aumentó 19.82 L/s esto puede atribuirse a que fueron anexados 2 barrios de esta ciudad (El llano la Cruz y el Diriangén), también por conexiones de industrias, conexiones ilegales, además de infiltraciones al alcantarillado sanitario por el crecimiento de la población y por desperdicios de agua que se puedan dar.

5.2. Determinación del caudal de la laguna mediante el balance hídrico

Tabla 10.- Determinación del caudal de la laguna mediante el balance hídrico

Unidad de tratamiento	Caudal medio del STAR	Evaporación	Área	Caudal de la laguna	
Laguna primaria	6598.71 m ³ /día	3.95 mm/día	1685.04 m ²	76.30 L/s	6592.06 m ³ /día
Laguna secundaria	6592.06 m ³ /día	3.95 mm/día	5589.30 m ²	76.04 L/s	6569.99 m ³ /día
Laguna terciaria	6569.99 m ³ /día	3.95 mm/día	8932.79 m ²	75.63 L/s	6534.73 m ³ /día

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó el dato promedio de evaporación de la estación meteorológica de Jinotega, tomando los valores del año 2018 (INETER, 2018), ya que los valores del corriente año siguen en estudio.

Se consideró el cálculo de balance hídrico, para conocer el caudal en el efluente de cada unidad de tratamiento a fin de saber cuánto contribuye la evaporación en la simplificación de su flujo, advirtiendo una reducción de caudal en la laguna secundaria; obteniendo como resultados, rangos menores en el efluente de la laguna terciaria, debido a las pérdidas evaporadas a lo largo del sistema; el valor total sin la evaporación es de 0.84 L/s y un valor tomando en cuenta la evaporación de 0.74 L/s, teniendo una diferencia de 0.09 L/s, que posiblemente se retenga en los taudes debido a que estos no son de concreto ciclópeo.

Conociendo que el balance hídrico solo se aplica en lagunas facultativas y de maduración a causa de que en las anaerobias no es posible, en vista de que generalmente la superficie es cubierta de una nata que impide en gran manera la evaporación (Cortes Martínez et al., 2011).

5.3. Determinación del período de retención

Es de gran envergadura mencionar que el período de retención es fundamental en la reducción de cargas contaminantes y patógenos; para su obtención en cada unidad de tratamiento se empleó la fórmula de Arthur, (1984), ver tabla N° 11.

Tabla 11.- Período de retención hidráulico TRH

Unidad de tratamiento	Volumen	Caudal Medio	TRH	Total
Laguna primaria	5560.63 m ³	6592.06 m ³ /dia	1 día	4 días
Laguna secundaria	8942.88 m ³	6569.99 m ³ /dia	1 día	
Laguna terciaria	10719.35 m ³	6534.73 m ³ /dia	2 días	

Fuente: Elaboración propia

La tabla N° 11 muestra los tiempos de retención obtenidos para cada unidad de tratamiento, utilizando los caudales promedio resultantes de los siete aforos realizados.

El valor real obtenido en la laguna primaria corresponde a 0.8 días, la laguna secundaria 1.4 días y la laguna terciaria 1.6 días, estos valores fueron obtenidos por la ecuación 5 de Arthur (1984), con un valor total de 3.8 días.

Estas lagunas no cumplen en la reducción de patógenos puesto que desde que comenzó operaciones han estado sobrecargadas hidráulicamente.

Cabe recalcar que a causa del mantenimiento que se le está dando actualmente al módulo A del sistema, el valor real de los períodos de retención se ve afectado, los cuales serían diferentes si las condiciones de funcionamiento en las lagunas fuesen

las que normalmente operan, siendo el período de retención total de 8 días entre ambos módulos, cuando este dio inicio en el año 2005.

El tiempo de retención hidráulico total del sistema es de 3.8 días, esto viene siendo menor a lo recomendado por la OMS/OPS que es de 10 días para la eliminación de patógenos y huevos de Helminthos (Mara y Cairncross, 1989).

Es importante que los períodos de retención no se vean afectados y se de una adecuada eficiencia dentro del sistema, para esto debe realizarse las obras contempladas del proyecto como son: La construcción de una laguna primaria, paralela a las lagunas primarias existentes, una laguna secundaria paralela también a las lagunas secundarias, más una laguna terciaria paralela a la laguna terciaria actual; formando así el módulo tres del sistema, esto estaba percibido para el año 2010, para así prolongar el tiempo de retención hidráulico, aproximadamente a 10.8 días.

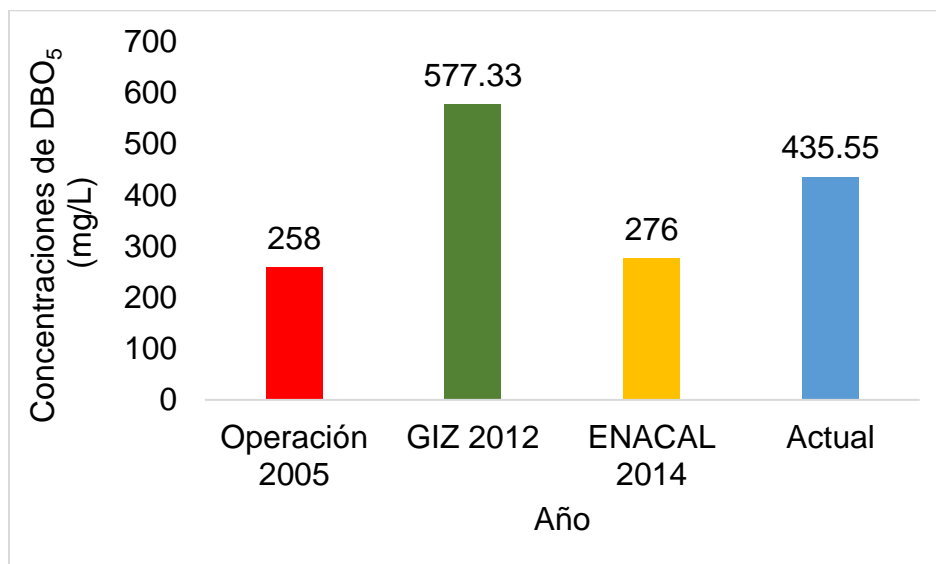
5.4. Resultados de análisis físicos – químicos del STAR

En el gráfico N° 5 se presentan las concentraciones de DBO_5 desde que inició operaciones hasta los obtenidos en esta investigación. Las concentraciones a lo largo del tiempo han experimentado un aumento, sin embargo en el muestreo realizado por ENACAL en el 2014 se presentó una disminución del 52% con respecto al del GIZ 2012, debido a que el muestreo fue realizado en invierno teniendo dilución en la muestra, al incremento de caudal que se da en el transcurso de los años, las condiciones climatológicas a la hora de la toma de muestras, las condiciones operacionales del sistema, el tipo de muestreo (simple o compuesto), entre otros.

Como se puede observar en el siguiente gráfico N° 5, este muestra que las concentraciones de DBO_5 que reporta GIZ es mayor que los reportados por ENACAL y el actual del sistema, esto se debe a que los de GIZ pueden haber tomado las muestras de forma puntal o también que el mes que realizaron la investigación por diferentes factores climáticos resultaron alterados, las muestras

que toma ENACAL así como el actual, fueron realizadas de forma compuesta durante un período de 24 horas, dado los parámetros que se pretendían evaluar.

Gráfico 5.- Concentraciones de DBO₅ en el afluente del STAR



Fuente: Elaboración propia

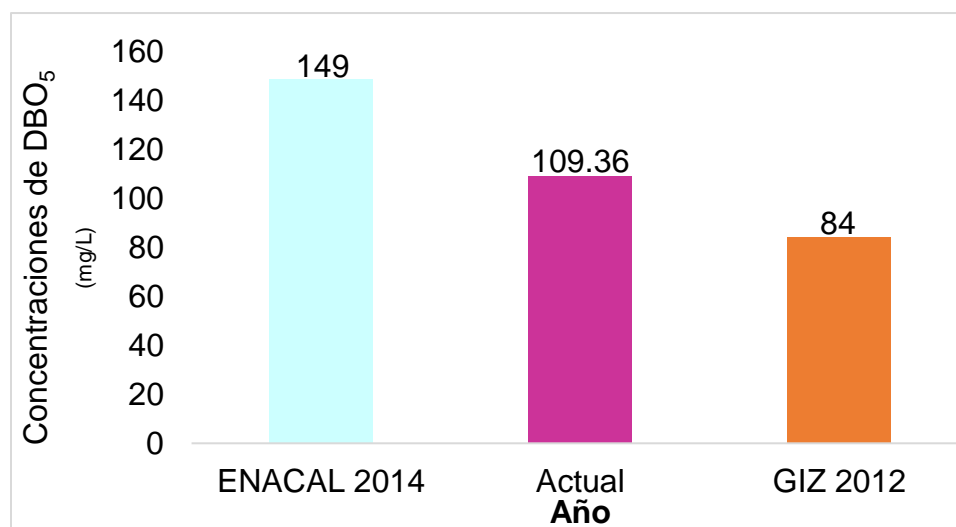
Como se puede observar en el gráfico N° 5, este muestra que las concentraciones de DBO₅ que reporta GIZ es mayor que los reportados por ENACAL y el actual del sistema, esto se debe a que los de GIZ pueden haber tomado las muestras de forma puntal o también que el mes que realizaron la investigación por diferentes factores climáticos resultaron alterados, las muestras que toma ENACAL así como el actual, fueron realizadas de forma compuesta durante un período de 24 horas, dado los parámetros que se pretendían evaluar.

Por otro lado se debe considerar que los muestreos de agua residual pueden ser fluctuantes como lo establece Metcalf (1995).

Se considera que las lagunas primarias funcionan con un buen porcentaje de remoción, debido a que dicho valor es cercano al rango de 70-85% de DBO₅ establecido en la NTON 05-027-05 (MARENA, 2018) para todo el sistema de tratamiento conformado por lagunas facultativas. Siendo su valor de 74.89% en el efluente general.

Respecto al DBO₅ en el efluente del sistema se cuenta con tres datos existente los cuales se reportan en el gráfico N° 6. Como se observa en este gráfico las concentraciones de DBO₅ de ENACAL son mayores que el actual y el de GIZ, debido a que en el año 2014 ambos módulos estaba saturados de lodos.

Gráfico 6.- Concentraciones de DBO₅ en el efluente del STAR



Fuente: Elaboración propia

Para el año 2017 se dio mantenimiento al módulo B que se encuentra en operación, gracias a esto presenta mayor cantidad de oxígeno disuelto, esto aumenta el crecimiento de algas y estas oxidan rápidamente la materia generando un ambiente aerobio.

La comparación de los datos del efluente final con los valores establecidos en el artículo N° 26 del Decreto 21-2017, Decreto 77-2003 parámetros en el artículo N° 7 y NTON 05 027-05, se presentan en la tabla N° 12.

Se observa en la tabla N° 12, que la concentración de DBO₅ de acuerdo a los límites máximos permisibles de 110 mg/L del artículo 26 del Decreto 21-2017 cumple ya que se obtuvo un valor de efluente general 109.36 mg/L; mientras que los parámetros establecidos en el Decreto 77-2003 en el artículo N° 7 y en los establecidos en la NTON 05 027-05, el valor de DBO₅ obtenidos es superior lo que

revela que a pesar que si se cumple Decreto 21-2017, no se cumple con los límites máximos permisibles para riego.

Tabla 12.- Resultados promedios del monitoreo de muestras de DBO₅

Afluente	435.55 mg/L
Salida laguna primaria	205.55 mg/L
Salida laguna secundaria	127.03 mg/L
Efluente	109.36 mg/L
Decreto 21-2017	110.00 mg/L
Decreto 77-2003	90.00 mg/L
NTON 05-027-05	30.00 mg/L

Fuente: Elaboración propia

5.5. Determinación de carga de nutrientes (fósforo total)

Tabla 13.- Resultados de fósforo total vs Decreto 21-17 en cada fase de tratamiento

MONITOREOS DEL 09 AL 14 DE JUNIO DE 2019	
UNIDADES DE TRATAMIENTO	PARÁMETROS (VALORES PROMEDIOS)
	FÓSFORO
Afluente	3.94 mg/L
Salida laguna primaria	5.54 mg/L
Salida laguna secundaria	2.91 mg/L
Efluente	2.67 mg/L
Decreto 21-2017	10.00 mg/L

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N° 13, se presentan los resultados obtenidos con respecto al Decreto 21-17 en su Artículo 26, valores máximos de fósforo que pueden ser vertidos a un cuerpo receptor, deben de ser de 10 mg/L.

Se puede observar que en la laguna primaria se da un aumento de fósforo, esto debido a que este nutriente sufre una transformación como ortofosfato y en consecuencia de la cantidad de lodos que esta posee se le suman como polifosfatos cuando experimentan su proceso de hidrólisis dando como resultados un aumento en la concentración de fósforo en la laguna primaria.

Con fundamento en los resultados se establece que el STAR de la ciudad de Jinotega si cumple con esta normativa, puesto que los valores obtenidos son menores en un 3.7% notablemente a los establecidos en el Decreto (valor promedio en el efluente: 2.67 mg/L). Esto debido a que las lagunas remueven nutrientes a tasas reducidas, su función principal es la remoción de materia orgánica.

Las concentraciones de fósforo en el STAR se deben en gran medida al uso de detergentes ya que estos contienen gran cantidad de fosfatos, adherido a las excretas (humanas y animales) que también poseen fósforo aunque estas presentan bajas concentraciones, el cambio de los resultados de fósforo a lo largo de los días de aforo se dan por el desarrollo de las actividades domésticas conforme va transcurriendo la semana, presentándose el día jueves con mayores cantidades de fósforo vertido al cuerpo receptor (2.90 mg/L) , cabe destacar también que esta es una zona agrícola es decir que usan bastantes fertilizantes y detergentes que pueden ser arrastrados por la precipitación que se presentó el día jueves hasta el sistema de alcantarillado sanitario.

5.6. Determinación de carga de patógenos (coliformes fecales)

Las lagunas facultativas, y en especial las lagunas de maduración, son muy eficaces en la eliminación de organismos patógenos, siendo los factores que influyen en su eliminación, el viento, la temperatura, el sol que juega un triple papel en la eliminación de las bacterias fecales mediante las lagunas (Alianza por el agua, s.f.)

Este parámetro es importante ya que, de acuerdo a los datos de coliformes totales y fecales, es una manera de asegurar que el agua depurada esté libre de microorganismos patógenos así como cumplir con los límites máximos permisibles estipulados en el artículo N° 24 Decreto 21-2017.

Hay que mencionar además que de acuerdo al artículo 24 se encuentra regido por el principio de gradualidad, es decir este da un período de tiempo en el cual de forma progresiva se debe cumplir con lo establecido en este artículo como se presenta en la tabla N° 14.

Tabla 14.- Períodos y límites establecidos por el Decreto 21-2017 respecto a coliformes fecales

Período de tiempo	2017- 2022	2023 – 2026	2027 – 2029
Coliformes fecales NMP/100MI	1.00E+0	1.00E+04	1.00E+03

Fuente: Elaboración propia

Estos períodos de tiempo se establecen siempre y cuando el vertido no se deposite a cuerpos de agua donde se afecte la salud humana (manteniendo los rangos establecidos por el Ministerio de Salud).

Tabla 15.- Valores promedios de afluente y efluente vs el decreto 21-2017, Decreto 77-2003

Unidades de tratamiento	Parámetros (valores promedios)
	Coliformes fecales (NMP/100mL)
Afluente	6.63E+07
Salida laguna primaria	8.55E+06
Salida laguna secundaria	1.18E+07
Efluente	1.25E+07
Decreto 21-2017	1.00E+05
Decreto 77-2003	5.00E+05

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tabla 15 están basados únicamente en el análisis efluente del sistema, al compararlos con el Decreto 21-2017 este no cumple según lo establecido en el período 2017-2022, el cual es de $1E+05$ NMP/100mL; del mismo modo al ser comparados estos resultados con el Decreto 77-2003, tampoco cumple con los parámetros que estipula el artículo N° 7 siendo de $5E+05$ NMP/100mL.

La OMS establece que es de 10 días el tiempo de retención para ello el sistema debe de poseer un buen diseño hidráulicamente, con temperaturas de 25°C, para que los ciclos remoción de patógenos puedan llevarse a cabo; con base en los datos obtenidos (ver tabla N° 11) el tiempo de retención del sistema actualmente es de cuatro días operando con el módulo B, es posible que debido a esto los valores de coliformes fecales no cumplan con lo establecido en el decreto 21-2017, añadiendo que los lodos extraídos de la laguna facultativas del módulo A son vertidos en la laguna facultativa del módulo B, alterando su composición y proceso.

Según las investigaciones realizadas en la zona norte del país a sistema lagunares, partiendo de los años 2017,2018 en Matagalpa, Estelí, Somoto, (Larios y Pravia, 2018; Betanco, 2018; Pinell y López, 2017) ninguno de estos sistemas de tratamiento cumple con los límites máximos permisibles de coliformes fecales.

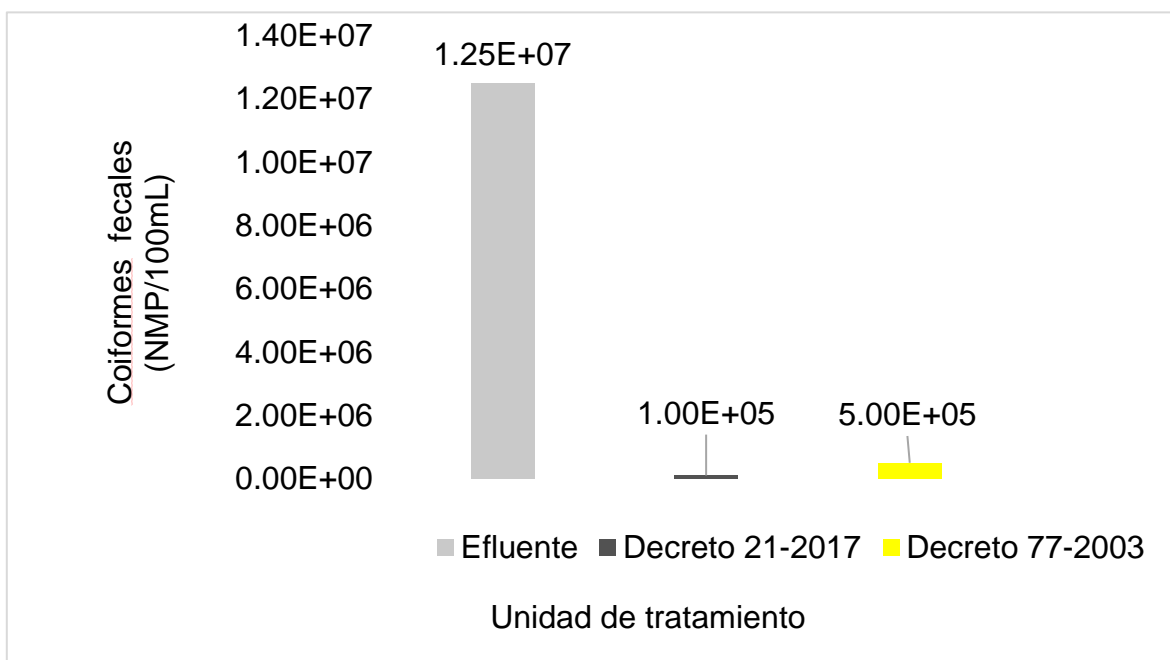
Esto se debe a que los sistemas lagunares han resultados eficientes para la reducción de cargas orgánicas y no para coliformes fecales y nutrientes, esta teoría fue comprobada por de Stewart M. Oakley en los sistemas lagunares de Honduras que llego a la misma conclusión en los sistemas de tratamiento de tipo lagunar.

En el gráfico N° 7, contiene los valores permisibles del Decreto 21-2017 y Decreto 77-2003, como se puede observar el efluente del STAR está por encima del valor máximo permisible de coliformes fecales de ambos.

La tabla N° 16, presenta los datos históricos de coliformes fecales, como se refleja en la tabla en el año 2014 presenta mayores eficiencias logrando una remoción de dos logaritmos, con respecto al estudio realizado en el año 2012 por GIZ, el valor actual presenta un dato en su efluente de $6.63 E+07$ y en efluente de $1.25 E+07$ NMP/ 100mL, mostrando una remoción deficiente ya que no se logra alcanzar la

remoción de al menos un logaritmo, esto debido a los períodos cortos de retención con el que están operando las lagunas al trabajar momentáneamente solo con el módulo B.

Gráfico 7.- Coliformes fecales promedio en el afluente y efluente vs decreto 21-2017 vs Decreto 77-2003



Fuente: Elaboración propia

Tabla 16.- Datos históricos de coliformes fecales en el efluente del sistema

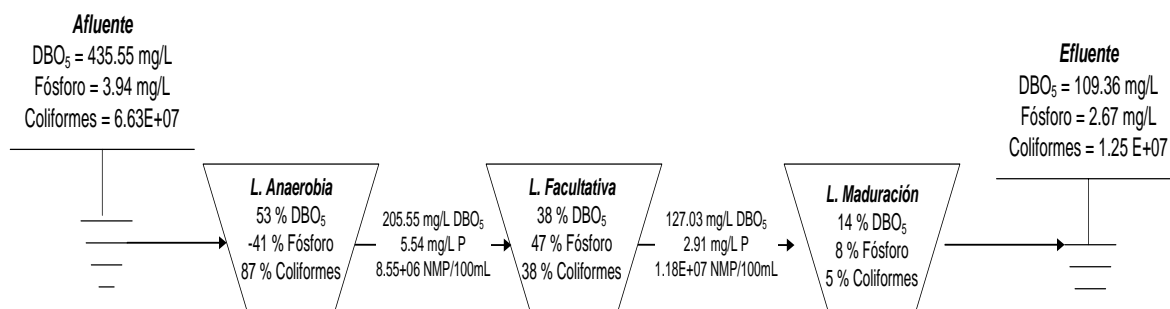
Año de estudio	Coliformes fecales en el afluente (NMP/100mL)	Coliformes fecales en el efluente (NMP/100mL)
Actual	6.63 E+07	1.25 E+07
ENAACAL 2014	3.50 E+08	2.4 E+06
GIZ 2012	7.45 E+07	3.84 E+06

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla N°16 nunca se ha cumplido los límites máximos permisibles con el Decreto 33-95 antes establecido y el Decreto 21-2017 establecido actualmente.

5.7. Determinación de las eficiencias del STAR

Esquema 7.- Rendimiento obtenido en cada unidad del STAR



Fuente: Elaboración propia

La laguna primaria presenta remociones favorables con respecto a dos de los parámetros evaluados (coliformes totales y DBO_5) en comparación a su afluyente, en cuanto a las lagunas secundarias se obtiene remociones altas en tres parámetros evaluados (coliformes fecales, fósforo y DBO_5) con respecto a su efluente y a la laguna primaria, en el efluente general se obtiene una alta remoción de los parámetros de coliformes totales, fósforo total y DBO_5 , sin embargo en cuanto a las normativas cumple con la mínima en DBO_5 y en coliformes fecales está lejos de cumplir.

Analizando los resultados del esquema N° 7, se observa que el sistema logra remover el fósforo en un 32.26 % sabiendo que estos sistemas lagunares no están diseñados para remover nutrientes, en relación a la concentración de DBO_5 este sistema logra remover un 74.89 % y una remoción de coliformes de 81.20 % esto quiere decir que el sistema lagunar se encuentra en buen estado gracias al constante mantenimiento y al seguimiento diario que se le da, a pesar de esto no

cumple con la normativa en cuanto a coliformes del Decreto 21-2017 y al Decreto 77-2003.

5.8. Determinación de carga orgánica

Las concentraciones de DBO₅ se utilizaron para la determinación de carga orgánica en cada unidad de tratamiento se observa en la tabla N° 17 la determinación de la carga orgánica total en función de la DBO₅.

5.8.1. Determinación de la carga orgánica total y carga orgánica per cápita

Tabla 17.- Carga orgánica total y carga orgánica per cápita a tratar con respecto a DBO₅

Unidad de tratamiento	Concentración (mg/L)	Caudal promedio (L/s)	Carga orgánica total (kg DBO ₅ /día)	Carga orgánica per cápita (g/hab/día)
Laguna primaria	435.55	76.37	2874.09	63.48
Laguna secundaria	205.55	76.30	1355.02	
Laguna terciaria	127.03	76.04	834.56	
Carga orgánica total (COT)			5063.67 kg DBO₅/día	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N° 17, se observa la tendencia que existe una relación directa entre la concentración de DBO₅ y la carga orgánica conforme aumenta los niveles de depuración debido a que disminuye la concentración de DBO₅.

Se observa que el valor de carga orgánica per cápita el cual es de 63.48 g/hab/día es mayor que el recomendado en las guías de diseño de INAA s.f. de 60 g/hab/día, esto se debe a que este valor fue tomado de referencias internacionales y no de los apegados a las concentraciones de aguas residuales nacionales.

La carga orgánica total de diseño del sistema que reporta GIZ (2012) es de 420.12 Kg DBO₅/día, iniciando operaciones con una carga orgánica total de 3248.29 Kg

DBO₅/día, la carga orgánica total de este estudio realizado es de 5063.67 Kg DBO₅/día.

Según un informe realizado por el PIENSA en el año 2005-2010 en su inventario de gases de efecto invernadero, consideraba un valor de 42 g DBO₅/hab/día, conforme al estudio realizado y las caracterizaciones de las aguas residuales en el sistema de tratamiento de la ciudad de Jinotega, se considera que el aporte percapita en el afluente es de 63.48 gDBO₅/hab/día lo que es un indicador muy importante porque refleja que las lagunas no están diseñadas con valores de carga nacional tal como establece la guía técnica para el diseño de alcantarillado sanitario y sistemas de tratamiento de aguas residuales con un valor de 60 gDBO₅/hab/día por lo que este valor podrá ser utilizado para diseño de futuros sistema de tratamiento de tipo lagunar.

5.8.2. Determinación de la carga orgánica superficial aplicada

Según la Organización Mundial de la salud citada por Rolim (1999) menciona que la carga orgánica superficial, que puede aplicarse a una laguna facultativa se encuentra entre los rangos de 200 y 400 kg/DBO₅/ha/día, para climas cálidos y templados.

Se presentan los resultados de carga orgánica superficial máxima en la tabla N° 18.

Tabla 18.- Carga orgánica superficial máxima

Carga orgánica superficial máxima		
Unidad	Temperatura °C	Csm
Laguna primaria	20.1	360.33 kg DBO ₅ / ha-día
Laguna secundaria		360.33 kg DBO ₅ / ha-día
Laguna terciaria		360.33 kg DBO ₅ / ha-día

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19.- Carga orgánica superficial aplicada real (Csa)

Carga orgánica superficial máxima			
Unidad	Carga orgánica (kg DBO ₅ /día)	Área (m ²)	Csa (kg DBO ₅ / ha-día)
Laguna primaria	2874.09	0.17	17056.51
Laguna secundaria	1355.02	0.56	2424.31
Laguna terciaria	834.56	0.89	934.27

Fuente: Elaboración propia

Los resultados presentados en la tabla 19, muestra que la laguna secundaria recibe un valor carga orgánica superficial aplicada real de 2424.31 kg DBO₅/ ha-día lo cual está por encima de carga orgánica máxima con un valor de 360.33 kg DBO₅/ ha-día.

Debido a que durante el mantenimiento del sistema, fueron vertidos lodos en esta laguna facultativa (módulo B), por lo que puede presentar deficiencias en su funcionamiento por la acumulación de lodos que posee, reduciendo el tirante de agua; por ende los tiempos de retención se ven afectados así como el proceso biológico de remoción de la materia orgánica.

5.8.3. Determinación de habitante equivalente

Las unidades empleadas para determinar la carga contaminante son los habitantes equivalentes (HE), el concepto HE está recogido en la Directiva Europea 91/271 de 21 de mayo de 1991 sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas. En ella se define habitante equivalente como la carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno de cinco días (DBO₅) de 60 gramos de oxígeno por persona y día.

Tabla 20.- Determinación de habitantes equivalentes para la zona norte del país

Municipio	Caudal (m ³ /día)	Concentración DBO ₅ (mg/L)	Carga orgánica biodegradable (g /he*d)	Habitante equivalente	Habitantes reales
Jinotega	6526.19	435.55	60.00	47375	53,265
Matagalpa	8791.20	300.75		44066	67,459
Sébaco	461.38	396.00		3045	4,704
Somoto	533.09	496.29		4409	4,606

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la tabla N° 20 que el cálculo de habitantes equivalentes para cada municipio da menor en relación con los habitantes reales; se puede considerar que las mediciones en la red de saneamiento no incluyen todos los caudales de aguas residuales, por no tener un control catastral de los habitantes que anualmente se van sumando a la red, lo que genera que existan mayores habitantes reales que equivalentes.

Por ende, al realizar una comparación de las ciudades se tiene como consecuencia: que la ciudad de Jinotega respecto a la ciudad de Somoto, tiene menor concentración de la materia orgánica teniendo en cuenta que sus habitantes equivalentes son mayores, por lo cual el caudal aumenta lo que da como resultado la dilución de esta concentración, reflejando que los habitantes de la ciudad de Somoto aportan más de los 60 g/he*día que se consideran; la ciudad de Somoto respecto a la ciudad de Matagalpa tiene mayor concentración de materia orgánica debido a que tiene menores habitantes equivalentes por lo tanto el caudal que entra es menor teniendo menor dilución de la concentración.

5.9. Determinación de gases de efecto invernadero (GEI)

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) tiene como objetivo lograr la estabilización de las concentraciones de

gases de efecto invernadero (GEI) en la atmosfera a un nivel que impida interferencias antropogenas peligrosas en el sistema climático.

Se considera solamente el metano ya que es el principal subproducto como resultado de la degradación anaerobia de la materia orgánica de las aguas residuales y posee un gran valor como combustible.

Para la determinación de las emisiones en este sector, se utilizó una combinación de metodologías de la IPCC, dado que de tomar valores por defecto, se sobre-estimarían las emisiones de metano.

5.9.1. Determinación de metano por medio del método de examen

Este método se utiliza para países que no cuentan con suficientes valores como: valores de grado de utilización de vía o sistema de tratamiento y/o eliminación (j), para cada fracción de grupo de ingresos (i) en el año del inventario (T_{ij}), fracción de la población del grupo de ingresos (i) en el año de inventario (U_i) y cantidad de CH_4 recuperada durante el año del inventario (R), por causa de la falta de inventarios de GEI y deben utilizarse valores por defecto para estimar de una forma aproximada las emisiones procedentes de las aguas residuales domésticas,

Este es un método elemental, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en su documento de inventario nacional de emisiones de gases de efecto de invernadero estipula que este método aumenta significativamente los resultados del cálculo de metano puesto que se usan valores por defectos antes mencionados dados por la misma IPCC.

Tabla 21.- Emisión de metano por el método de examen

Unidades de tratamiento	Población (hab)	Carga Orgánica (g/hab/día)	SBF	FE g CH ₄ /g DBO ₅	(FTA)	Emisión de CH ₄ kg ch ₄ /año
Laguna Primaria	53265	63.48	0.5	0.60	0.8	296200.38
Laguna Secundaria	53265	29.93	0.5	0.60	0.8	139646.73
Laguna terciaria	53265	18.43	0.5	0.60	0.8	86009.24
					Total	521856.35

Fuente: Elaboración propia

SBF: Fracción de DBO₅ que se sedimenta; **FE:** Factor de emisión; **FTA:** Fracción de DBO₅ en lodos.

Este método nos brinda un valor por defecto de carga orgánica per cápita respecto a la DBO₅ de 60 g de DBO₅/persona/día, a pesar de ello se tomó como valor 63.48 g de DBO₅/persona/día dado que en este estudio se realizó el cálculo para la obtención de carga orgánica per cápita para que el resultado sea coherente a lo que puede generar cada unidad de tratamiento.

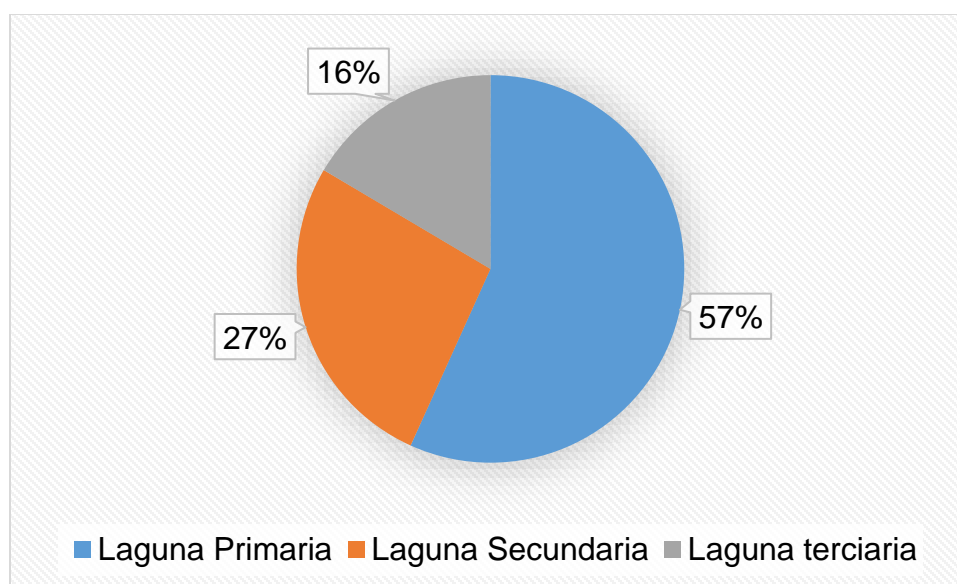
La IPCC implementa un valor de 0.5 para SBF dado que se le atribuye más del 50% de la DBO₅ de las aguas residuales domésticas a los sólidos no disueltos; muchos países estiman que de los lodos presentes en las lagunas para una fracción de la DBO₅ esta se degradara a un 80% de la materia, por esta razón es que el IPCC para el FTA reporta un valor de 0.8.

Como se observa en la tabla N° 21 , cada unidad de tratamiento presenta diferentes densidades de metano, en primer lugar se encuentra la laguna primaria esta contiene la mayor concentración de metano con un valor de 296,200.380 kg CH₄/año puesto que en ella es vertida el agua cruda y posee toda la materia orgánica teniendo en cuenta que esta es uno de los principales factores para la

generación de gases en los cuerpos de agua; según el PIENSA (2010) la sedimentación en las lagunas primarias es de un 30 a 35% de la materia orgánica, la llevando a cabo su proceso de degradación.

En segundo lugar se encuentra la laguna secundaria, con respecto a la laguna primaria hay una gran diferencia, siguiendo con el proceso en esta unidad su afluente ingresa con un porcentaje menor de materia orgánica con respecto a la primera laguna, siendo su valor de emisión de metano de 139,646.73 kg CH₄/año, en tercer lugar encontramos la última unidad de tratamiento con un valor de 521856.35 kg CH₄/año 20 % menos que la emisión en la primera unidad, puesto que este sistema tienen una gran eficiencia en sus proceso y al llegar a esta laguna no posee altas cantidades de materia orgánica, puesto que según el PIENSA (2010) solo el 25% de materia orgánica llega a esta unidad.

Gráfico 8.- Emisión anual de metano mediante el método de examen



Fuente: Elaboración propia

Los datos que refleja el gráfico son valores con mucha incertidumbre y con alteraciones a lo que cada unidad de tratamiento puede producir por porcentaje de metano al año, puesto que los valores utilizados en esta metodología son mayoritariamente por defecto y no coinciden con los del país de estudio.

5.9.2. Determinación del metano por el método de recopilación de datos

Conforme a lo estipulado en el árbol de decisiones establecido en la IPCC, este método se adapta para los países ubicados en el nivel dos, porque consiente la integración de datos de la actividad específicos del país, por lo tanto las estimaciones de metano ofrecen resultados compatibles a las condiciones de la zona de estudio facilitando valores fiables para poder ser usados en investigaciones futuras.

Fue primordial calcular la materia orgánica degradable (TMOD) ver tabla N° 22, utilizando los valores actuales de la población conectada al STAR (53, 265), y los valores de materia orgánica per cápita de cada unidad de tratamiento (ver tabla N° 17), utilizando el valor de corrección de DBO₅ por defecto ($I = 1$) ya que no hay industrias conectadas a la red de alcantarillado.

Cabe destacar que se utilizó un factor de conversión de g DBO₅ a kg DBO₅ = 0.001.

Tabla 22.- Total de materia orgánica degradable (TOW)

Unidades de Tratamiento	P	DBO ₅ (g/hab/día)	I	TMOD
Laguna primaria	53265 hab	63.48	1	1234168.24
Laguna secundaria	53265 hab	29.93	1	581861.39
Laguna terciaria	53265 hab	18.43	1	358371.82

Fuente: Elaboración propia

TMOD: Total de materia orgánica degradable; **P:** Población

La tabla N° 22 muestras valores razonables que actúan en manera decreciente de acuerdo a cada unidad de tratamiento, considerando que los valores más altos en el la laguna primaria y laguna secundaria se dan por las grandes cantidades de

materia orgánica que envuelven ofreciendo de manera significativa un indicador de que en esas unidades alcanzan niveles más altos en la emisión de metano.

El valor de la fracción de la población del grupo de ingreso (**Ui**), se tomó el 57.3 % equivalente a las personas distribuidas en el área urbana, según los datos proporcionados por el informe del (PIENSA, 2010).

El grado de utilización de las vías de sistema de tratamiento (**Tij**), según la (IPCC, 2006) en su cuadro 6.5, su valor es de 0.8, agregando que se utilizó el valor de población urbana de bajo ingreso del país de México, siendo este un valor más compatible a la realidad de los países centroamericanos.

Para obtener el factor de emisión (**EFj**), se calculo el factor de emisión de metano para cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación de aguas residuales domésticas. Ver resultados en la tabla N° 23.

Tabla 23.- Factor de emisión CH₄

Ecuación	Capacidad máxima de producción de CH ₄ (B _o)	Factor corrector para el metano (MCF _j)	Factor de emisión (EF _j)
EF_j = B_o * MCF_j	0.25 kg CH ₄ /kg DBO ₅	0.22	0.055 kg CH ₄ /kg DBO ₅

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a los valores de **B_o** se utilizó los recomendados por el (IPCC, 2006) en su cuadro 6.2: capacidad máxima de producción de CH₄ (B_o) por defecto para las aguas residuales domésticas. Y el valor de **MCF_j**, en base a juicio de expertos y estudios para sistemas de tratamiento de aguas residuales como los utilizados en Nicaragua: Lagunas de estabilización = 0.22, (PIENSA, 2010).

Con respecto a la capacidad máxima de producción de CH₄ (B_o), para poder mantener coherencia con los datos de esta actividad, es recomendable que se

utilicen los datos específico del país, en caso de que no se cuente con un estudio acerca de esto se puede utilizar lo que recomienda el IPCC.

Tabla 24.- Emisión de metano por el método de recopilación de datos

Unidades de tratamiento	TOW (kg DBO ₅ /año)	S (kg DBO ₅ /año)	U _i	T _{ij}	E _{fj} (kg CH ₄ /kg DBO ₅)	R (kg CH ₄ /año)	Emisión de CH ₄ (kg CH ₄ /año)
Laguna primaria	1234168.24	0.00	0.573	0.8	0.055	0.00	31115.85
Laguna secundaria	581861.39	0.00	0.573	0.8	0.055	0.00	14669.89
laguna terciaria	358371.82	0.00	0.573	0.8	0.055	0.00	9035.27
Total							54821.01

Fuente: Elaboración propia

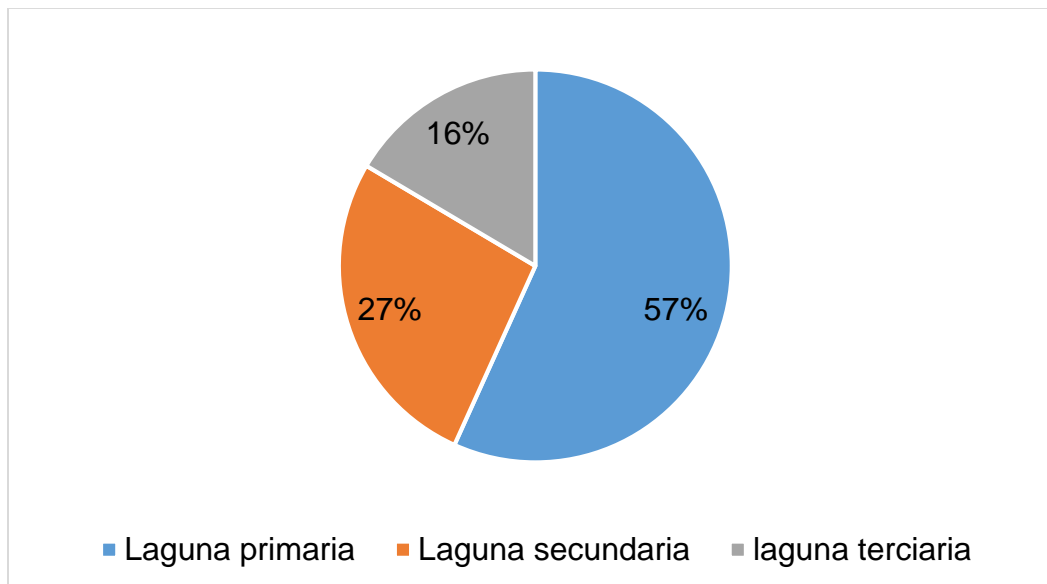
TMOD: Total de materia orgánica degradable; **S:** Componente orgánico separado; **U_i:** Fracción de la población del grupo de ingresos; **T_{ij}:** Grado de utilización de vía sistema de tratamiento; **E_{fj}:** Factor de emisión; **R:** Cantidad de CH₄ recuperada

En el país no se dispone de datos sobre la separación de lodos y sobre la recuperación de CH₄. El valor por defecto para la separación de lodos es cero. El valor por defecto para la recuperación de CH₄ es cero (IPCC, 2006).

Puesto que se disponen de diversas variables para la utilización de este método, otorga valores fidedignos respecto a sus resultados, destacando que este método se realizó de acuerdo a la carga orgánica en función de DBO₅, teniendo a las primeras unidades del tratamiento las que dan un mayor aporte en la emisión de metano debido a sus altas concentraciones de DBO₅.

Se multiplicó por un factor de 365 días en el total de materia orgánica, que corresponde a un año de inventario para conseguir las emisiones de metano anuales, en el siguiente gráfico se detallan estos valores:

Gráfico 9.- Emisión anual de metano mediante el método de recopilación de datos



Fuente: Elaboración propia

Como se refleja y se constata en el gráfico N° 9 la emisión de metano por cada unidad del STAR va conforme a las concentraciones de DBO_5 , ya que fueron evaluados con base a este parámetro.

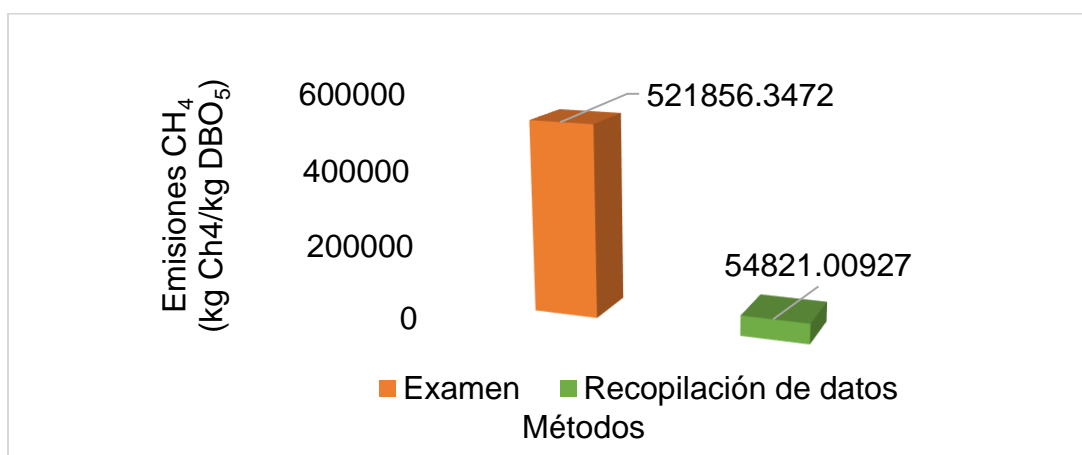
Los porcentajes de emisión de metano laguna primaria 57% y laguna secundaria 27%, la laguna terciaria es la que menor valor de metano presenta siendo este de 16 %; igual al total de emisión anual del STAR de la ciudad de Jinotega que es de 54821.01 kg CH_4 /año.

Cabe recalcar que aunque este método nos brinda datos más aproximados a las emisiones de estos sistemas en el país, no podemos decir que exactamente así sucede, dado que por la falta de estudios que constaten valores para las estimaciones de GEI se deben utilizar datos de otros países tal como fue el caso del valor de población urbana de bajo ingreso se tuvo que utilizar el valor del país de México, siendo este un valor más acorde a la realidad de los países centroamericanos.

5.9.3. Comparación del método de examen y el método de recopilación de datos, para las emisiones de metano

Con el fin de mejorar la confiabilidad de los métodos y de mostrar datos que sirvan para estimaciones de metano futuras, se realizaron comparaciones entre el método de examen y el de recopilación de datos con los valores obtenidos de emisiones de CH₄ producidos por este sistema de tratamiento.

Gráfico 10.- Emisión anual de metano por el método de examen vs el método de recopilación de datos



Fuente: Elaboración propia

En el proceso de comparación, se identificó un valor para el método de examen de 54821.009 kg CH₄/año y para el de recopilación de datos 521856.347 kg CH₄/año reflejados en el gráfico N°10.

Esto se da porque el método de examen utiliza valores por defecto para poder estimar emisiones de metano establecidos en la IPCC, si nos quedáramos con los valores arrojados por este método no tendríamos datos aproximados a lo que realmente está generando este sistema, dado que sus resultados son valores alterados al ser asumidos utilizados de igual forma para poblaciones altas como bajas; aun así para países que carecen de información se utiliza para proyectar el cálculo de la emisión de metano.

Mientras que el método de recopilación de datos nos garantiza datos más confiables y aproximados a la realidad esto gracias a que en el país se han realizado algunos informes de GEI esto nos permite utilizar valores para la aplicación de este método y se adecua a la población con la que realmente cuenta el país, este método por mucho viene siendo de más fiabilidad en cuanto a la veracidad de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO VI

Conclusiones y recomendaciones

“El océano es el alcantarillado universal”
-Jacques Yves Cousteau.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Producto de la evaluación del STAR de la ciudad de Jinotega, se determinó el cambio del caudal del afluente como del efluente general, esto a través de aforos con período comprendido de 24 horas consecutivas durante siete días, a partir del día sábado 8 al día jueves 13 de junio del 2019, con valores promedios en la entrada de 76.37 L/s y en la salida 75.53 de L/s. Esta variabilidad de caudal es posible por las pérdidas de agua en el sistema debido a la evaporación, asimismo de los errores que pudieron haberse dado al momento de la toma de caudales, puesto por la falta de un elemento de medición del tirante en el canal que conduce al efluente.

Conforme a la determinación del funcionamiento operacional de las lagunas basadas en el período de retención, se alcanzaron los valores redondeados de un día para la laguna primaria, un día para la laguna secundaria y de dos días para la laguna terciaria, de tal manera que el STAR cuenta con un período de retención total de cuatro días; cabe señalar que actualmente este sistema está operando solamente con uno de sus módulos (módulo B) por mantenimiento.

La eficiencia para cada fase de tratamiento en la laguna anaerobia es de: 53% DBO₅, - 41% fósforo, 87% coliformes, para la laguna facultativa, 38% DBO₅, 47% fósforo, 38% coliformes, y para la laguna de maduración, 14% DBO₅, 8% fósforo, 5% coliformes. Con una eficiencia global en la entrada y la salida en los valores de DBO₅ 74.89%, 32.26 % de fósforo y coliformes fecales de 81.20 %.

Por lo anterior podemos decir que pese a que el STAR cuenta con una eficiencia bastante significativa respecto a la remoción de coliformes fecales, su disposición final no cumplen para poder ser vertidos en el cuerpo receptor, ya que el valor máximo permisible es de 1.00E+05 NMP/100 mL, con base al artículo 24 Decreto 21-17, para el período entre el año 2017 al año 2022; así como tampoco cumple al ser comparado con el Decreto 77-2003 ya que su límite máximo permisible es de 5.00E+05 NMP/100mL.

No obstante, en relación a la remoción de nutrientes (fósforo total) si cumple de acuerdo a lo establecido en el artículo 26 del Decreto 21-17, donde el valor máximo permisible es de 10 mg/L, siendo superior al valor promedio del efluente que en este caso es de 2.67 mg/L.

Según el estudio de la simulación de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes de las unidades de tratamiento que conforman el STAR, usando el método de examen que utiliza valores por defecto se obtuvo un valor de 521,856.35 kg CH₄/año, al utilizar el método de recopilación de datos que tiene mayor seguridad, se obtuvo un valor total de emisión de metano anual de 54,821.001 kg CH₄/año, por lo que es un indicio de que los sistemas lagunares generan una cantidad significativa de GEI; y esto ayuda a que en el futuro en Nicaragua se puedan diseñar los STAR tomando en consideración estos parámetros de emisión.

6.2 Recomendaciones

Para que el STAR de Jinotega sea sustentable, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

1. Es recomendable realizar monitoreo sistemático de usuarios con el fin de encontrar conexiones ilegales a la red de alcantarillado, y del mismo modo constatar conexiones de industrias en el sistema para regular la dosificación de cloro a utilizar, realizarse al menos trimestralmente.
2. Ejecutar la segunda etapa de ampliación del sistema de tratamiento de forma que pueda balancear su eficiencia conforme al aumento de la población y sus conexiones al alcantarillado.
3. Remodelación de la infraestructura para la protección del personal de mantenimiento.
4. Desarrollar capacitaciones a operadores, ingenieros municipales y responsables en el monitoreo, para que se pueda dar seguimiento de: catastro de conexiones, medición de caudales, cargas, y medición de la acumulación de lodos.
5. Realizar nuevas ordenanzas para definir las tarifas que puedan cubrir los costos de la operación y mantenimiento de las instalaciones.
6. Implementar proyectos para el tratamiento y reutilización de los lodos y desechos que son extraídos de las unidades de tratamiento.
7. Se recomienda realizar e implementar una evaluación del impacto ambiental para identificar, prevenir y minimizar el impacto que producirá las emisiones de GEI procedentes del STAR, garantizando la viabilidad del sistema en relación con el medio ambiente.
8. Mantenimiento y rehabilitación de taludes en las unidades de tratamiento.

Bibliografía



***“El agua es el principio de todas las cosas”
-Tales De Mileto.***

BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía Municipal de Jinotega. (2008). *Ordenanza para el manejo integral de residuos sólidos no peligrosos*. Jinotega, Nicaragua.
- Alianza por el agua. (s.f.). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. Ideasamares.
- Alvarado, R., & Villanueva, R. (2017). *Evaluación de la Remoción de Carga Orgánica del Nuevo Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) de la ciudad de Somoto, Madriz, Nicaragua*. Managua, Nicaragua.
- Arthur, J. (1984). *Notes on the design and operation and waste stabilization ponds in warm climates of Developing countries*. Technical paper Number 7 E.U.A.
- Betanco, M. (2018). *Evaluación de la remoción de carga de nutrientes y patógenos del nuevo sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Somoto*. Managua.
- Blandon, J., & Valenzuela, Y. (2018). *Determinación de valores per cápita de carga orgánica, nutrientes y patógenos en el sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Sébaco*. Managua.
- Brock, T. . (2004). *Biología de los microorganismos*. Pearson: Pearson educations.
- Chapman, A. S. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico*.
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento; Diseño de lagunas de estabilización*. Mexico D.F: Autor.
- Cortés Martínez, F., Luevanos Rojas, A., Luevanos Rojas, R., Uranga Sifuentes, A. C., Avila Garza, C. M., & Gonzalez Barrios, J. L. (2011). Diseño de Lagunas de estabilización en serie con diferentes configuraciones. (Caso comarcalagunera estado de Durango, Mexico). *Revista de arquitectura e ingeniería*.
- Cortés, M., Treviño, C., & Tomasini, O. (2017). *Dimensionamiento de lagunas de estabilización*. Mexico: IMTA.
- DYWIDAG. (2003). *Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Jinotega, manual de operación y mantenimiento*. Jinotega, Nicaragua.
- EPA. (2011). *Principios de Diseño y Operaciones de sistemas de estanques de tratamiento de aguas residuales para operadores de plantas, ingenieros y gerentes* . Cincinnati, Ohio.

- Espigares, G., & Perez, L. (1985). *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Granada.: Universidad de Granada. Servicio de Publicaciones.
- GIZ. (2012). *Diagnostico general de 35 sistemas de tratamiento de agua residual de ENACAL*. Managua, Nicaragua: Autor.
- Huttunen, J. ., (2001a). “*Greenhouse Gases in Non- Oxygenated and Artificially Oxygenated Eutrophied Lakes during Winter Stratification*”. J. Environmental .Quality.
- IPCC. (2001). *Contribución del Grupo de Trabajo I al Tercer Informe de Evaluación de Cambridge, Reino Unido*. New York, USA: Autor.
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC del 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Hayama, Japón: Instituto para las Estrategias Ambientales Globales (IGES).
- KFW. (2016). *Historia del proyecto de agua de Matagalpa y Jinotega*. Autor.
- Larios, J., & Pravia, N. (2018). *Determinar valores per cápita de carga orgánica, nutrientes y patógenos en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) en la ciudad de Matagalpa*. Managua.
- Liikanen, A. (2002b). “*Greenhouse Gas and Nutrient Dynamics in Lake Sediment and Water Column in Changing Environment*”. in: vol. 147Kuopio University Publications C, Vol. Ph.D. Thesis Natural and Environmental Sciences. Kuopio, Finland: university publications.
- Mara, D., & Cairncross, S. (1989). *Guidelines for the Safe Use of Wastewater and Excreta in Agriculture and Aquaculture*. Geneva: World Health Organization.
- Marais, G., & Van Haandel, A. (1996). *Design of Grit Channels Controlled by Parshall Flumes*. Water Science and Technology.
- MARENA. (2018). *Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Managua, Nicaragua: Autor.
- Martinez, G. T. (2002). *Factibilidad tecnica-economica del sistema de alcantarillado sanitario para la ciudad de Juigalpa*. Managua - nicaragua.
- Metcalf, E. (1995). *Ingeniería de las aguas residuales vol.1*. España: Impresos y Revistas, S.A (IMPRESA).
- NTON 05-027-05. (2005). *Norma Técnica Obligatoria Nicaraguense para regular los Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales y su reúso*. Managua, Nicaragua.

- Oakley, S. M. (1998). *Lagunas de Estabilización para Tratamiento de Aguas Negras: Las Experiencias de Honduras, Nicaragua, El Salvador y Guatemala*. Tegucigalpa, Honduras: Red Regional de Agua y Saneamiento de Centro América (RRAS-CA).
- Oakley, S. M. (2005). *Manual de diseño, construcción, Operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad. lagunas de estabilización de Honduras*. Universidad Estatal de California.
- OEFA. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Lima, Peru: Autor.
- OMS. (2017). *Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene*. Ginebra, Suiza.
- PIENSA. (2010). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, sector desechos*. Managua, Nicaragua.
- Pinell, W., & López, F. (2017). *Evaluación operacional del sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de Estelí, departamento de Estelí, Nicaragua*. Managua.
- PRENSA. (2006). *Diario la prensa*. Obtenido de <https://www.laprensa.com.ni/2006/01/09/departamentales/967149-alcalda-mejorar-aseo-de-jinotega>
- Ramallo, R. S. (1990). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverte.
- Rolim, S. (1999). *Lagunas de estabilización ¿Por qué no usarlas? Seminario Internacional Tratamiento de aguas residuales a través de humedales naturales y artificiales y lagunas de estabilización*. Bogotá, Colombia: Organización Panamericana de la Salud.
- Sanchez, D. (2015). *Contaminación del agua*. España: Universidad de Castilla - La Mancha.
- Yáñez, F. (1984). *Reducción de organismos patógenos y diseño de lagunas de estabilización en países en desarrollo, XIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)*. Santiago, Chile.

ANEXOS



***“Si no plantamos el árbol de la sabiduría cuando jóvenes,
no podrá prestarnos su sombra en la vejez”***

-Conde de Chesterfield.